

Anschlüsse in Buchenholz

Ermittlung von Grundlagen zur Bemessung von Anschlüssen
für die Marktimplementierung in der Schweiz

Forschungsbericht

Autoren
Steffen Franke
Bettina Franke
Sebastian Heubuch
Andrea Frangi
Robert Jockwer



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Umwelt BAFU
Aktionsplan Holz

ETH zürich



Empa

Materials Science and Technology

Anschlüsse in Buchenholz

Ermittlung von Grundlagen zur Bemessung von Anschlüssen für
die Marktimplementierung in der Schweiz

Forschungsbericht

Bericht Nr.	R.007465-F1-01
Projekt Nr.	R.007465-10-77FE-01
Klassifizierung	Öffentlich
Datum	4. Dezember 2019
Auftraggeber	Bundesamts für Umwelt (BAFU) im Rahmen des Aktionsplans Holz Bestellnummer 110004361 Kreditnummer A2310.0134 Wald Vertragsnummer 09.0063PJ/O405-33997
Adresse der Forschungsstelle	Berner Fachhochschule Institut für Holzbau, Tragwerke und Architektur Soothurnstrasse 102, CH-2504 Biel 6 Tel / Fax +41 (0)32 344 03 41/91 www.ahb.bfh.ch
Editoren	Steffen Franke, Bettina Franke
Projektverantwortlicher	Prof. Dr. Steffen Franke
Institutsleiter	Prof. Andreas Müller

*Dieses Projekt wurde realisiert mit Unterstützung des Bundesamt für Umwelt (BAFU)
im Rahmen des Aktionsplans Holz.*

Autoren

Steffen Franke
Bettina Franke
Sebastian Heubuch
Andrea Frangi
Robert Jockwer

ISBN 978-3-906878-06-5

© Berner Fachhochschule, Institut für Holzbau, Tragwerke und Architektur

Editoren: Steffen Franke, Bettina Franke

Titelfoto: ETH Zürich, BFH-AHB

Copyright © 2019 by Berner Fachhochschule, Institut für Holzbau, Tragwerke und Architektur und Autoren. Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und das der Übersetzung, sind vorbehalten.

Dieses Projekt wurde mit Unterstützung des Bundesamts für Umwelt (BAFU) im Rahmen des Aktionsplans Holz sowie Wirtschafts- und Industriepartner und Experten realisiert.

Berner Fachhochschule
Architektur, Holz und Bau
Institut für Holzbau, Tragwerke und Architektur
Solithurnstrasse 102, CH-2504 Biel
Tel / Fax +41 (0)32 344 03 41/91
www.ahb.bfh.ch

Vorwort

Für die aktuellen Bestrebungen zur Marktimplementierung von Laubholz und deren Bauprodukte wie Vollholz, Konstruktionsvollholz und Brettschichtholz wurden für Anschlüsse die grundlegenden Eigenschaftswerte und Bemessungsrichtlinien für Buche erarbeitet. Erst durch die qualitätssichere Realisierung von hochleistungsfähigen formschlüssigen Kontaktanschlüssen und Anschlüssen mit mechanischen Verbindungsmitteln können Tragwerke in Laubholz qualitativ abgesichert errichtet werden. Getrennt nach der Beanspruchungsart (Zug, Druck, Schub) und nach der Beanspruchungsrichtung (parallel, senkrecht, Winkel zu Faser) wurden die Festigkeits- und Tragfähigkeitsparameter für marktaktuelle Anschlusskonfigurationen (u.a. Schrauben, Stabdübel, Gewindestangen) mechanisch geprüft und zur Validierung von Bemessungsansätzen genutzt.

Das Forschungsvorhaben ist Gegenstand des Gesuchs «Brettschichtholz aus Laubholz», welches sich aus zwei Teilprojekten (TP) zusammensetzt:

- TP 1 «Technische Grundlagen zur Marktimplementierung als Bauprodukt in der Schweiz», Hauptgesuchsteller Empa, Abteilung Ingenieur-Strukturen, Dr. René Steiger
- TP 2 «Anschlüsse in Buchenholz - Ermittlung von Grundlagen zur Bemessung von Anschlüssen für die Marktimplementierung in der Schweiz», Hauptgesuchsteller Berner Fachhochschule, Prof. Dr. Steffen Franke

Das Teilprojekt 2 ist Gegenstand des vorliegenden Berichtes und wurde vom Bundesamt für Umwelt im Rahmen des Aktionsplan Holz, den folgenden Partnern aus Forschung, Industrie und Wirtschaft gefördert und den Experten begleitet. Im Rahmen der Bearbeitung konnten Bachelor- und Masterthesen erfolgreich abgeschlossen werden und erste Ergebnisse veröffentlicht werden. Der Projektleitende und die Mitarbeitenden wie auch Studierenden bedanken sich für die Realisierung und Unterstützung innerhalb des Forschungsprojektes.

Wirtschafts- und Industriepartner

- | | |
|---------------------------------------|---------------------------|
| - Häring Projekt AG | - Fagus Suisse SA |
| - Blumer Lehmann AG | - Burgergemeinde Burgdorf |
| - SFS unimarket AG | - Burgergemeinde Biel |
| - Würth AG | - Lignum Schweiz |
| - Sherpa Connector AG | - Holzbau Schweiz |
| - Henkel & Cie. AG | - Koller Sägerei AG |
| - Corbat Holding SA Industrie du bois | - Krähenbühl Sägerei AG |
| - Raurica Wald AG | |

Forschungspartner und Experten

- BFH-AHB, Institut für Holzbau, Tragwerke und Architektur
- ETH Zürich, Institut für Baustatik und Konstruktion
- Dr. René Steiger, Empa, Abteilung Ingenieur-Strukturen
- Markus Zimmermann, IHT Rafz Ingenieurholzbau + Holzbautechnik GmbH
- Urs Christian Luginbühl, Holzindustrie Schweiz
- Prof. Ernst Gehri, ETH Zürich, emeritiert
- Prof. Dr. Pierre Quenneville, Universität von Auckland
- Dr. Ulrich Hübner, Fachverband der Holzindustrie Österreich

Projektverantwortlicher und -leiter

Prof. Dr. Steffen Franke

Zusammenfassung

Laubholz ist evolutionsbedingt neuer als Nadelholz und diese Chronologie lässt sich auch auf die Anwendung und Bekanntheit im Ingenieurholzbau übertragen. Die Entwicklungen von Produkten aus Nadelholz und auch das Fügen von Bauteilen untereinander in Anschlüssen ist langjährig erforscht, anerkannt und angewandt. Im aktuellen Ingenieurholzbau sind Laubhölzer eher noch die Exoten.

Die aktuelle Statistik der Forstwirtschaft Schweiz durchgeführt vom Bundesamt für Statistik belegt das 32 % des gesamten Holzvorrates auf Laubholz fallen, wobei mit 18 % die Holzart Buche den Schwerpunkt bildet.

Das Forschungsvorhaben konzentriert sich auf die Bemessung und Ausbildung von Anschlüssen in Buchenholz. Die Betrachtungen umfassen die mechanischen Verbindungsmittel, Stabdübel/Passbolzen, Schrauben und eingedrehte und eingeklebte Gewindestangen. Es wurden Versuchsreihen zur Prüfung des Einbringverhaltens und der Mindestrand- und Verbindungsmittelabstände untereinander sowie Traglastversuche an kleinformatigen Anschlüssen wie auch mit praxisrelevanten Grössen durchgeführt.

Die einzelnen Arbeitspakete wurden interaktiv mit den Partnern aus der Wirtschaft und Forschung sowie Experten diskutiert und umgesetzt. Der Fokus lag stets auf duktile hochleistungsfähige Anschlüsse, die den natürlichen höheren Festigkeiten von Buche entsprechen. Im ersten Schritt wurden typische Anschlüsse im Nadelholz für die zukünftige Anwendung in Buchenholz priorisiert. Hierauf aufbauend wurde das Versuchsprogramm entwickelt und durchgeführt.

Für Anschlüsse mit Stabdübeln wurde für das Einbringen eine Differenz von 0.1 mm zwischen Bohrloch und Verbindungsmitteldurch-

messer anhand von praktischen und wissenschaftlichen Untersuchungen bestimmt. Die Mindestrand- und Verbindungsmittelabstände der SIA 265:2012 bestätigen sich, wobei zur Erhöhung der Duktilität grösser Abstände empfohlen werden. Für die Bemessung können die aktuell gültigen Bemessungsansätze der SN EN 1995-1-1:2010 sowie SIA 265:2012 unter Anpassung der Lochleibungsfestigkeit und Ansatz eines Seileffektes von 20 % angewandt werden.

Für Anschlüsse mit Schrauben ergaben die Einbringversuche, dass Schraubenverbindungen ohne Vorbohrung in Vollholz oder Brett-schichtholz aus Buche bis zu einer Einschraublänge von $15d$ zulässig sind. Schrauben mit längeren effektiven Gewindelängen in Buchenholz sind generell vorzubohren. Ausgenommen sind Schrauben mit besonderer Eignung für Laubholz. Für die Beanspruchung rechtwinklig und in Schaftrichtung wurden Bemessungsempfehlungen basierend auf der SN EN 14952 erarbeitet.

Für eingeklebte Gewindestangen kann das bisher in der DIN EN 1995-1-12/NA:2010 dargestellte Bemessungskonzept angewandt werden, wobei als charakteristische Ausziehfestigkeit 10 N/mm^2 verwendet werden kann, was gegenüber Anschlüssen in Nadelholz zu einer 2.5-fachen Traglast führt. Das vorzeitige Aufspalten konnte durch ein Zurückversetzen der Einklebelänge um $5d$ effektiv ausgeschlossen werden. Somit sind Randabstände von $1.75d$ ohne Abminderung realisierbar was zu einer Ausnutzungsgrad bis zu 100 % führt. Für das Einbringen und Ausführen von Anschlüssen sind die Massnahmen zur Qualitätssicherung zwingend anzuwenden.

Keywords: Holztragwerke, Laubholz, Anschlüsse, Versuche, Bemessung, Stabdübel, Schrauben, Eingeklebte Gewindestangen

Inhaltsverzeichnis

Modul 0 – Einführung und Grundlagen

1 Einführung.....	11
2 Projektorganisation und Gliederung Forschungsbericht.....	15
3 Wissenstransfer	16
4 Zusammenfassung	17
5 Literatur.....	18

Modul 1 – Katalog von Anschlüssen in Laubholzkonstruktionen

1 Einführung.....	3
2 Beanspruchungsarten - Verbindungsarten.....	4
3 Übersicht der bewerteten Verbindungen	6
4 Bemessungsrelevante Details der einzelnen Verbindungen je Verbindungsart/Verbindungsmittel.....	7
5 Annahmen, Grundlagen und Diskussionen zum Versuchsprogramm	16
6 Literatur.....	24
Anhang A Katalog der einzelnen Verbindungen je Verbindungsart/Verbindungsmittel	27
Anhang B Begriffe und Definitionen zu den Verbindungsmitteln	46
Anhang C Festigkeitskennwerte für Laubholz	48

Modul 2/3 – Teil A – Verbindungen mit Stabdübeln

1 Allgemeines.....	3
1.1 Informativ	3
1.2 Festlegungen zu den Versuchsprogramm	3
2 Material	4
2.1 Lamellen und Brettschichtholz.....	4
2.2 Stabdübel.....	5
3 Vorversuche Einbringen der Stabdübel.....	7
3.1 Allgemein.....	7
3.2 Einteilige Prüfkörper	7
4 Vorversuche Tragfähigkeit von Stabdübelverbindungen	11
4.1 Herstellung der Prüfkörper	11
4.2 Getestete Verbindungen	11
4.3 Versuchsaufbau und Durchführung.....	12
4.4 Auswertungsschema.....	13
4.5 Versagensmechanismen	14
4.6 Ergebnisse parallel zur Faserrichtung	15
4.7 Ergebnisse rechtwinklig zur Faserrichtung – Verbindungen mit mehreren Stabdübeln.....	32
4.8 Ergebnisse rechtwinklig zur Faserrichtung - ein Verbindungsmittel	35
4.9 Verbindungen mit Passbolzen	38
5 Hauptversuchsserien.....	42
5.1 Einführend	42
5.2 Parallel zur Faserrichtung.....	42
5.3 Senkrecht zur Faserrichtung.....	48
6 Diskussion der Ergebnisse	56
6.1 Mindestrand- und Mindestverbindungsmitteleabstände	56
6.2 Grundlagenparameter Lochleibungsfestigkeiten.....	57
6.3 Anzahl der Verbindungsmittel in Lastrichtung	57
6.4 Tragfähigkeit und Bemessung	59
7 Zusammenfassung	67
8 Literaturverzeichnis.....	68

Anhang A Ergebnisse Einbringversuche für Stabdübel	71
A.1 Einbringkräfte einteilige Prüfkörper	71
A.2 Einbringkräfte zweiteilige Prüfkörper 4 und 5	73
Anhang B Versuchsserien zu Anschlüssen	74
B.1 Kennwerte der Versuchsserien für parallel zur Faser beansprucht	74
B.2 Tragfähigkeiten und Steifigkeiten der Anschlüsse parallel zur Faser	76
B.3 Kennwerte zu den Versuchsserien senkrecht zur Faser	81
B.4 Tragfähigkeiten und Steifigkeiten zu Anschlüssen senkrecht zur Faser	82
B.5 Tragfähigkeiten und Steifigkeiten der Passbolzenversuche parallel zur Faser	88
B.6 Tragfähigkeiten und Steifigkeiten der Passbolzenversuche senkrecht zur Faser	88
Anhang C Versagensbilder	89
C.1 Versuche parallel zur Faser – Stabdübel	89
C.2 Vorversuche rechtwinklig zur Faserrichtung	113

Modul 2/3 – Teil B – Verbindungen mit Schrauben und eingedrehten Gewindestangen

1 Inhalte und Ziele der Vorversuchsserien	5
2 Versuchsprogramm	5
2.1 Material	5
2.2 Einbringversuche	7
2.3 Auszugsversuche	10
2.4 Scherversuche	13
3 Ergebnisse	17
3.1 Einbringversuche	17
3.2 Auszugsversuche	49
3.3 Scherversuche	58
4 Literatur	78

Modul 2/3 – Teil C – Verbindungen mit eingeklebten Gewindestangen

1 Allgemeines	3
1.1 Informativ	3
1.2 Festlegungen zum Versuchsprogramm	4
2 Material	4
2.1 Lamellen und Brettschichtholz	4
2.2 Zugfestigkeit der Gewindestangen	5
2.3 Klebstoff	6
3 Vorversuche Einkleben von Gewindestangen	7
3.1 Einbringvoraussetzung/Verklebung	7
3.2 Prüfung der Einbringvoraussetzungen	8
3.3 Auswertungsschema	9
3.4 Ergebnisse der Einbringvoraussetzungen	10
4 Vorversuche zu Anschlüssen mit Einzel-Gewindestangen	12
4.1 Prüfkörper und Herstellung	12
4.2 Versuchsdurchführung	12
4.3 Prüfung der Ausziehparameter	14
4.4 Prüfung der Einbindelänge l_{ad}	16
4.5 Prüfung des Randabstand $a_{2,c}$	19
5 Hauptversuchsprogramm	21
5.1 Allgemeines	21
5.2 Verbindungen mit mehreren Gewindestangen, $\alpha = 0^\circ$, (Zug-Zug-Versuch)	21
5.3 Verbindungen mit mehreren Gewindestangen, $\alpha = 90^\circ$, (Zug-Druck-Versuch)	22
6 Bemessungsvorschlag	24
6.1 Bemessungsmodelle	24
6.2 Randabstände	24

6.3 Ausziehfestigkeiten	24
6.4 Qualitätssicherung	26
7 Zusammenfassung	27
8 Literaturverzeichnis	28
Anhang A Ergebnisse der Auszugsversuche	31
A.1 Tragfähigkeit und Ausziehfestigkeit für Einbringversuche	31
A.2 Last-Verschiebungskurven je Prüfserie	38
A.3 Versagensbilder	43

1 Einführung

1.1 Grundlagen und Inhalte des Forschungsprojektes

Laubhölzer bieten durch ihre zumeist natürlich höheren mechanischen Festigkeiten ein gutes Potential für hochbeanspruchte Bauteile und Anschlüsse, wie sie bisher in der Regel nur in Massiv- oder Stahlbauweise bekannt sind. Ein erhöhter Laubholzeinsatz sollte nicht zur Konkurrenzierung zu Nadelholzprodukten führen, sondern die Wettbewerbsfähigkeit und damit den Absatzmarkt von Holz im Allgemeinen stärken. In den Schweizer Wäldern fallen zurzeit 32 % des gesamten Holzvorrates auf Laubholz, wobei mit 18 % die Holzart Buche den Schwerpunkt bildet, Eidg. Forschungsanstalt (2018). Bestände, in denen eine Nadelbaumart vorherrscht, haben gesamtschweizerisch leicht abgenommen, wohingegen die Bestände von Buche und Ahorn als Baumart zugenommen haben, Brändli (2010). Die wirtschaftliche Marktanalyse der Schweizer Holzindustrie und Waldwirtschaft belegt zudem, dass Laubholz als Säge-Rundholz im Einkauf ab Wald um ca. 30 % günstiger ist als Nadelholz, Gross & Schmutz (2010) und dass zurzeit in den Laubholzsägereien ungenutzte Einschnittkapazitäten vorliegen sowie die lokale Weiterverarbeitung fehlt.

Erste realisierte Bauobjekte in der Schweiz belegen das Potential für den Einsatz von Laubholz in Tragwerken und haben aufgrund der vorhandenen Defizite in abgesicherten Angaben für die Bemessung von Bauteilen aus Laubholz und der entsprechenden Verbindungen zurzeit noch einen Pilotcharakter. Zur Erhöhung des Absatzmarktes ist es wichtig, dass die gesamte Prozesskette zur Errichtung von Tragwerken in Laubholz analysiert und optimiert wird. Neben der Entwicklung von neuen Bauprodukten und der Kenntnis über deren mechanische Eigenschaften ist die Sicherung von Kontaktanschlüssen und Anschlüssen mit mechanischen Verbindungen eine entscheidende Grundlage zur Errichtung von zuverlässigen, leistungs- und wettbewerbsfähigen Tragwerken. Dabei ist es essentiell, dass der Wirkungsgrad von Anschlüssen und Verbindungen den natürlich höheren mechanischen Eigenschaften von Bauprodukten aus Laubholz entsprechen muss. Neue leistungsfähige Bauprodukte in Laubholz mit höheren mechanischen Charakteren führen zur Realisierung Tragwerken mit grösseren Spannweiten, schlankeren Querschnitten und höheren Beanspruchungen, die für ein qualitätsgerechtes Bauen ein hohes Mass an Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit fordern.

Für Kontaktanschlüsse und Anschlüsse mit mechanischen Verbindungen beruhen die in nationalen und internationalen Standards vorhandenen normativen Regelungen vorrangig auf experimentellen Untersuchungen an Nadelholz und sind bis dato noch nicht umfassend und vollständig für Laubholz geprüft worden. Gerade für hochbeanspruchte und hochleistungsfähige Anschlüsse ist es wichtig, abgesicherte und zuverlässige Regeln und Konzepte für die Bemessung für die Architekten, Planer und Ingenieure zu Verfügung zu stellen.

Hohe Tragleistungen im Bereich von Anschlüssen bedeuten gleichzeitig sehr hohe Beanspruchungen im Holz im Bereich der Verbindung. Hierbei kann das eigentliche Tragverhalten durch ein ausgesprochen sprödes Bruchverhalten ohne eine nennenswerte Versagensankündigung geprägt sein. Für eine

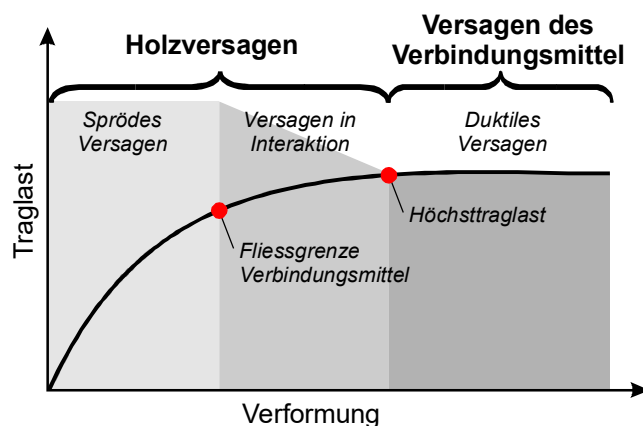


Abb. 1: Trag- und Versagensverhalten von Anschlüssen in Abhängigkeit von der Verformung, vgl. Zarnani & Quenneville (2013)

sichere Nutzung, gerade für die angestrebten hochleistungsfähigen Anschlüsse in Laubholz sollte daher ein möglichst duktiles Trag- respektive Versagensverhalten angestrebt werden, wobei ein vorzeitiges sprödes Versagen von Holz auszuschliessen ist, vgl. Abb. 1. Nur durch diese Kombination können robuste und qualitätssichere Tragwerke erzielt werden.

1.2 Ziele des geplanten Forschungsvorhabens

Laubhölzer haben evolutionsbedingt zumeist ein sehr hohes Potential an Festigkeit. Die natürlichen hohen Festigkeiten in Relation zur Rohdichte sind eine wegweisende Konkurrenz zu Stahl- und Massivbauwerkstoffen. Gegenwärtig wird diese nachwachsende hochleistungsfähige Ressource bereits in vielfältigen Entwicklungsstufen für neue Bauprodukte aus Laubholz genutzt. Jedoch ist es genauso wichtig für die Errichtung von Tragwerken und Ingenieurbauwerken hochleistungsfähige Anschlüsse sowie abgesicherte Bemessungsmodelle für den Architekten, Planer und Ingenieur zur Verfügung zu stellen. Für die Errichtung eines Tragwerkes in Laubholz muss die gesamte Prozesskette, vom Wald über den Einschnitt, die Trocknung, die Bereitstellung von Bauprodukten und die Ausbildung sowie Bemessung von Anschlüssen betrachtet werden. Innerhalb des Forschungsprojektes ist es daher das Ziel, für formschlüssige Kontaktanschlüsse und insbesondere Anschlüsse mit mechanischen Verbindungsmitteln

- die grundlegenden konstruktiven Anforderungen zu bestimmen,
- die mechanischen Festigkeitsparameter zu ermitteln,
- für verschiedene Anschlusskonfigurationen die Traglasten zu prüfen,
- verfügbare Bemessungsrichtlinien zu überprüfen bzw. für Laubholz anzupassen
- praxisrelevante Bemessungsgrundlagen zur Verfügung zu stellen.

Die Untersuchungen innerhalb des Projektes werden sich auf die marktaktuellen Anschlüsse und Konstruktionsquerschnitte aus Vollholz, Konstruktionsvollholz oder Brettschichtholz aus Buchenholz konzentrieren.

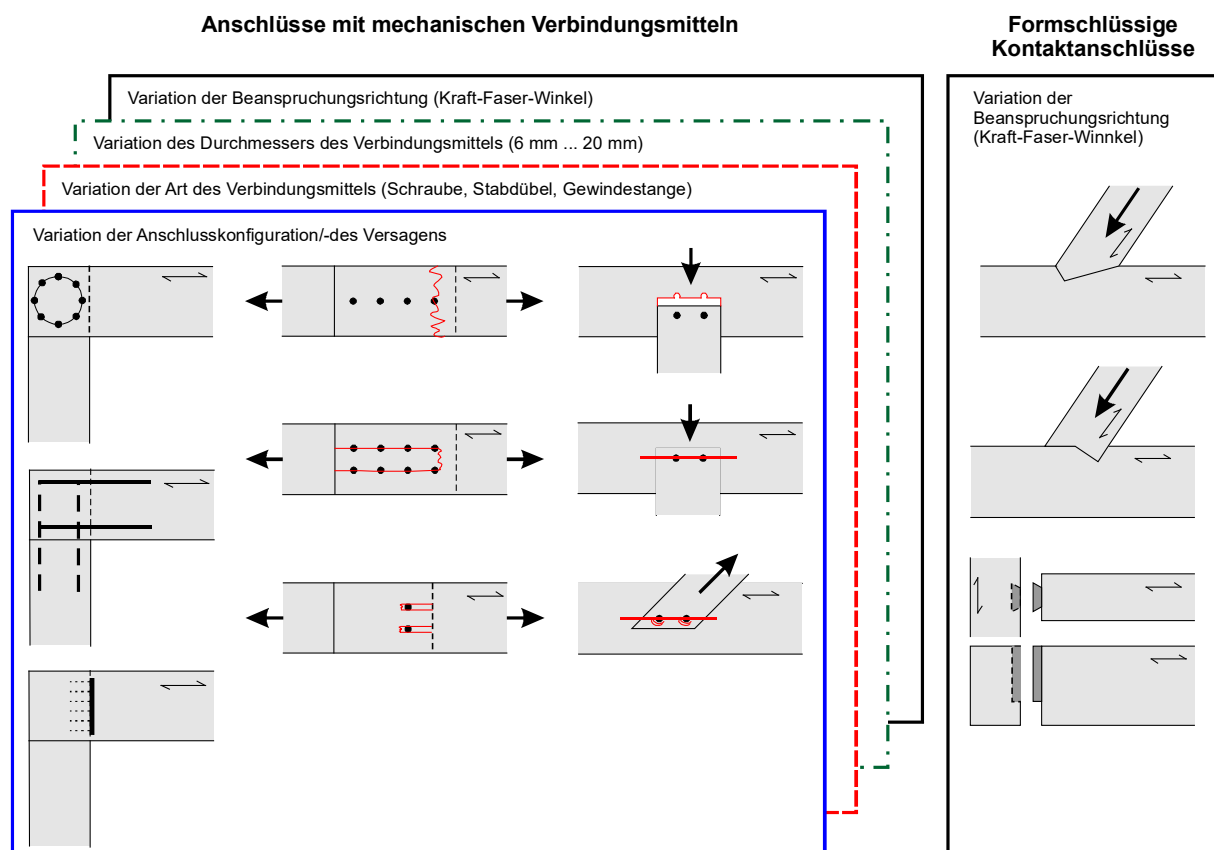


Abb. 2: Überblick zu beispielhaften Anschlussvarianten und Variationsparametern

Heutzutage steht auf dem Markt eine Vielfalt von Anschlüssen zur Verfügung, die Parallelitäten in der konstruktiven Ausbildung und Bemessung aufweisen, aber dennoch zu einer grossen Variation von mechanischen Kennwerten führen. Abb. 2 zeigt einen beispielhaften Überblick zu Anschlüssen im Holzbau. Primär erfolgt die Unterteilung in Holz-Holz-Anschlüsse, die formschlüssigen Kontaktanschlüsse, und in Anschlüsse mit mechanischen Verbindungsmitteln. Generell umfassen beide Anschlussgruppen eine Variation der Beanspruchungsrichtung, dem sogenannten Kraftfaserwinkel, der Holzart, den Rohdichten und den Versagensarten. Im Bereich für Anschlüsse mit mechanischen Verbindungsmitteln müssen, zu dem die folgenden Variationsparameter zur Erarbeitung von abgesicherten Bemessungsrichtlinien integriert und untersucht werden:

- Variation des Verbindungsmitteltyps (Schrauben, Stabdübel, Gewindestangen)
- Variation des Durchmessers des Verbindungsmittels im Bereich von 6 mm bis 25 mm
- Variation der Beanspruchungsrichtung, Kraftfaserwinkel im Bereich von 0° bis 90°
- Variation der Einbindelänge für Auszieh Widerstände von Schrauben und Gewindestangen
- Statistisch abgesicherter Umfang je Konfiguration/Serie

1.3 Projektergebnisse

Zur Förderung des Laubholzabsatzes sollen die bemessungs- und ausführungsrelevanten Grundlagen für hochleistungsfähige Anschlüsse in Tragstrukturen aus Laubholz geschaffen werden. Die qualitätssichere sowie anwendungsorientierte Ausbildung von Anschlüssen bildet den Schwerpunkt des Projektes und ist entscheidend für die Errichtung von Tragwerken aus Laubholz für Hallen, Brücken, Wohn- und Verwaltungsgebäude. Für die Ausbildung von Verbindungen in Voll- und Brettschichtholz aus Buchenholz ergeben sich die zentralen Fragen aus den gegenwärtig marktüblich verwendeten Anschlusskonfigurationen und Stössen. Aus der nachfolgend dargestellten Übersicht sind relevante Verbindungsarten zu identifizieren und unter Berücksichtigung der Variation des Verbindungsmittels und Beanspruchungsart statistisch abgesicherte Kennwerte sowie praxisnahe Regeln und Bemessungshilfen zu erarbeiten.

Für die **Anschlusskonfiguration**:

- Verbindungsmitteltyp (Nägel, Schrauben, Bolzen, Stabdübel, Gewindestangen)
- Relevante Kontaktanschlüsse (z. B. Versätze, Zapfen)
- Relevante Anschlüsse mit Blechformteilen oder marktüblichen Verbindern (Nagelplatten, Balkenschuhe, Sherpa-Verbinder)
- Beanspruchungsart und -richtung (parallel, senkrecht oder einem Winkel zur Faser)

Für das **Tragverhalten des Verbindungsmittels, Anschlusses**:

- Lochleibungsfestigkeit
- Verschiebungsmodul
- Auszieh Widerstand
- Mindestrand- und Verbindungsmittelabstände zur Reduzierung der Spaltgefahr beim Einbringen/Setzen

Für die **Bemessung des Anschlusses**:

- Ableitung von charakteristischen Kennwerten
- Abminderungsfaktoren aufgrund von Gruppeneffekten
- Einfluss der Rohdichte und Holzfeuchte auf die Tragfähigkeit
- Einfluss der Dauer der Einwirkung auf die Festigkeit
- Nachweiskonzepte getrennt nach Beanspruchungs- und Verbindungsmittelart
- Festlegung von Bemessungswerten, welche nicht durch Versuche begründet werden können
- Im allgemeinen Duktilität

Parallel zu den experimentellen Untersuchungen zur Ermittlung der mechanischen Kennwerte von Anschlüssen ist auch die Prüfung respektive Validierung der normativen Bemessungsgrundlagen für Laubholz ein Ziel innerhalb des Projektes. Für die Umsetzung müssen, die in den nationalen und internationalen Bemessungsstandards enthaltenen Ansätze und Methoden überprüft und gegebenenfalls angepasst werden. Die bisher enthaltenen Bemessungskonzepte basieren vorrangig auf experi-

mentellen Untersuchungen an Nadelholz und entsprechen nur bedingt den Spezifikationen von Laubholz. In diesem Teilziel ist die angestrebte Zusammenarbeit mit den Ingenieurbüros, Experten und Normengremien entscheidend für praxisrelevante Lösungsansätze und eine zukünftige Einbettung in Normenwerke. Durch die Berücksichtigung der Vielfalt an Verbindungsmitteldurchmessern und Beanspruchungsrichtungen entsteht eine fein abgestufte und fundierte Einschätzung des Trag- und Versagensverhaltens von Anschlüssen, was wiederum zu qualitativ zuverlässigen Nachweisverfahren führt. Die Projektergebnisse bilden abschliessend eine sehr gute Ausgangsbasis zur Erarbeitung von den in Nadelholz bekannten Bemessungstabellen von Anschlüssen.

Für eine effiziente und praxisnahe Ermittlung der notwendigen Kennwerte der Verbindungen werden zu Beginn des Projektes, im Arbeitspaket 2, in Absprache mit allen Projektpartnern die zu untersuchenden notwendigen Parameter sowie die Versuchsanzahl in Abhängigkeit der zur Verfügung stehenden Mittel abgestimmt und festgelegt.

Das Projekt liefert Grundlagen zur Realisierung von Tragwerken in Laubholz, denn erst durch die qualitativ sichere Ausbildung von Anschlüssen und Verbindungen können zuverlässige und wettbewerbsfähige Bauwerke in Laubholz entstehen. Hierbei ist es entscheidend, dass hochleistungsfähige Anschlüsse aber auch abgesicherte Bemessungsmodelle zur Verfügung stehen, die dem natürlich hohen Festigkeitspotential von Laubhölzern entsprechen. Das Projekt liefert in Abhängigkeit zu identifizierten relevanten Verbindungsarten die folgenden Regeln, Kenngrössen und Bemessungsansätze zu Verbindungen in Laubholz:

- Lochleibungsfestigkeiten
- Verschiebungsmoduln
- Auszieh Widerstände
- Konstruktive Regeln (Mindestrand- und Verbindungsmittelabstände)
- Bemessungsregeln für mechanische Verbindungsmittel
- Bemessungsregeln für Holz-Holz-Verbindungen
- Regeln zur Anwendung von Verbindungsmittelgruppen
- Grundlagen für Bemessungstabellen

2 Projektorganisation und Gliederung Forschungsbericht

2.1 Projekt

Das Projekt wurde in 4 Hauptmodule gemäss Abb. 3 gegliedert. Nach jedem Modul wurde eine Evaluierung zur detaillierten Anpassung des folgenden Projektmoduls vorgesehen. In jedem Projektmodul wirkten Ingenieure aus der Praxis wie auch aus der Wissenschaft für eine optimale und effiziente Erarbeitung der Grundlagen für qualitätssichere Anschlüsse in Laubholz mit. Ferner ist jeweils mit den Experten und Forschungspartner in allen Themengebieten eine Abstimmung, Rücksprache und Erfahrungsaustausch auf wissenschaftlich technischer Ebene erfolgt. Die Mitarbeit der Wirtschaftspartner konzentrierte sich zudem auf die Bereitstellung von Rund- und Schnittholz, Verbindungsmitteln und Klebstoffen sowie die Fertigung von Prüfkörpern unter praxisnahen Aspekten.

In dem sehr dynamischen Projektablauf sind Entscheidungen bezüglich des Versuchsprogrammes und -umfanges getroffen worden, die abweichend vom ursprünglichen Forschungsgesuch sind. Nach dem Abschluss des Modul 1 wurde die Betrachtung von Kontaktanschlüssen beendet. Für Anschlüsse mit Schrauben resp. eingedrehten Gewindestangen wurde das Tragverhalten in Vorversuchsreihen untersucht. Verbindungen mit Schrauben in praxisrelevanten Dimensionen sind nicht experimentell durchgeführt worden. Anhand der Ergebnisse aus den Vorversuchsreihen wurde der Fokus der experimentellen Untersuchungen auf Stabdübel, Schrauben und eingeklebte Gewindestangen gelegt.

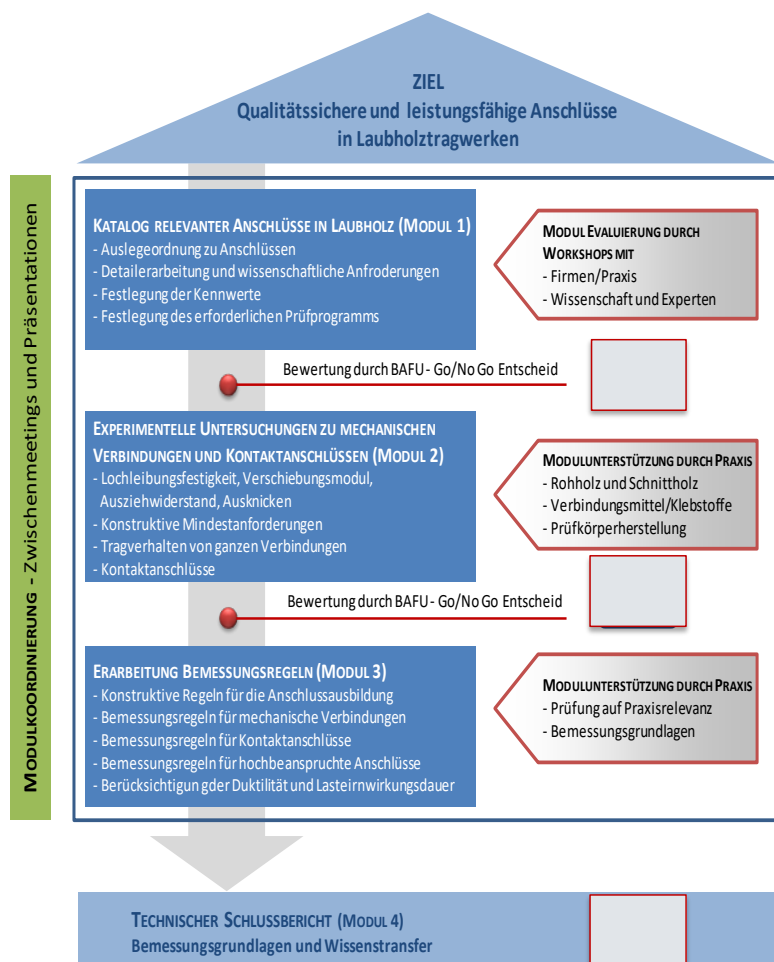


Abb. 3: Gliederung des Forschungsprojektes

2.2 Aufbau des Forschungsberichtes

Der vorliegende Forschungsbericht unterteilt sich in Anlehnung an die durchgeführten Projektmodule respektive den betrachteten Verbindungsmitteln in den Anschlüssen. Die Tab. 1 zeigt die Inhalte und die Verantwortlichen in der Bearbeitung des Themenpaketes. Die Forschungsergebnisse sind je Verbindungsmittelart für die experimentellen Untersuchungen, den Testergebnissen und die Bewertungen mit Bemessungsvorgaben in die Gruppen A bis C zusammengefasst.

Tab. 1: Darstellung der Inhalte des Forschungsberichtes

	Inhalte	Bearbeitung
Modul 1	Katalog relevanter Anschlüsse in Laubholz Darlegung der Bemessungsgrundlagen und relevanten Materialparameter in Laubholz (Lochleibungsfestigkeit und Herausziehfestigkeit)	Berner Fachhochschule, ETH-Zürich, Praxispartner
Modul 2/	Experimentelle Untersuchungen zu mechanischen Verbindungen	
Modul 3	Erarbeitung von Bemessungsregeln	
A	Anschlüsse mit Stabdübeln	Berner Fachhochschule tw. ETH-Zürich, Praxispartner
B	Anschlüsse mit Schrauben und eingedrehten Gewindestangen	ETH-Zürich, Praxispartner
C	Eingeklebte Gewindestangen	Berner Fachhochschule, Praxispartner
Modul 4	Wissenstransfer und Bemessungsgrundlagen vgl. Kapitel 3	Berner Fachhochschule, ETH-Zürich

3 Wissenstransfer

Innerhalb des Forschungsprojektes konnten Studierende der ETH-Zürich und der Berner Fachhochschule Masterthesen an praxisrelevanten Themen erfolgreich umsetzen. Weiter sind bereits erste Forschungsergebnisse auf nationalen und internationalen Fachveranstaltungen vorgestellt oder in Dokumentationen, Journalen veröffentlicht.

- Charles Mulenga (2017) Investigations on effective number of fasteners in multiple fastener steel to timber hardwood connections, Master Thesis, BFH-AHB
- Chuan-Hou Chang (2017) Numerical Modelling and Experimental Analysis of Step Joints in Hardwood, Master Thesis, BFH-AHB
- Möller J. K. (2017) Beech wood joint with dowel type fasteners – High performance in modern timber structures, Master Thesis, ETH Zürich
- Graffé Ch. (2019) High performance connections with dowel-type fasteners in beech laminated timber, Master Thesis, ETH Zürich
- Sebastian Heubuch (2019) Bewertung der Tragfähigkeit von eingeklebten Gewindestangen in Laubholz, Master Thesis, BFH-AHB, Abschluss Sept. 2019
- Franke S., Franke B. (2018) Multiple steel dowel type connections in beech hardwood, WCTE
- Franke, S., Heubuch S., Franke B. (2018) Glued-in rods in beech hardwood – Investigation of predrilling diameter and pull-out resistance, WCTE
- Franke, S., Franke B. (2018) Dowelled connections and glued-in rods in beech wood, In: Sandhaas C., Munch-Andersen J., Dietsch P. (2018) Design if Connections in Timber Structures, ISBN 978-3-8440-6144-4

- Franke S., Franke B. (2018) Fundamentals and recent strength results of connections in modern hardwood timber structures, Wood Material Science & Engineering, DOI: 10.1080/17480272.2018.1526822
- Franke S., Franke B. (2018) Fundamentals and recent strength results of connections in modern hardwood timber structures, Forum Wood Building Nordic, Växjö, Schweden
- Franke, S., Franke B. (2019) Brettschichtholz aus Buche – Leistungsfähige Verbindungen, SIA Dokumentation D0265
- Franke S., Franke B. (2019) Steel dowel-type connections in beech hardwood, INTER, Seattle, USA

4 Zusammenfassung

Das Forschungsvorhaben zu Anschlüssen in Laubholz – Buchenbrettschichtholz wurde von insgesamt 22 Forschungs- und Wirtschaftspartnern initiiert und gemeinsam sehr dynamisch bearbeitet und erfolgreich abgeschlossen. Basierend auf der Auslegeordnung und den Diskussionen in Workshops wurden die praxisrelevanten Schwerpunkte für die experimentellen Untersuchungen festgelegt. Der Fokus lag auf hochleistungsfähige und gleichzeitig duktile Anschlüsse mit den mechanischen Verbindungsmitteln Stabdübeln, Schrauben und eingedrehten sowie eingeklebten Gewindestangen. Die experimentellen Untersuchungen sind stufenweise über die Bewertung des Einbringverhaltens der Verbindungsmittel, der konstruktiven Ausführung wie Rand- und Achsabstände bis hin zum Tragverhalten der Gesamtverbindung durchgeführt wurden.

Das Forschungsprojekt verwendete ausschliesslich einheimisches Buchenholz aus den umliegenden Burgergemeinden, welches von Schweizer Sägewerken für die spätere Brettschichtholzproduktion zu Lamellen eingeschnitten und getrocknet wurde. Die Fertigung des Brettschichtholzes sowie der Ab- und Bund der Verbindungen erfolgten ebenfalls in nationalen Firmen, so dass die Erfahrungen und Fragestellungen mit den «neuen Produkt - Buchenbrettschichtholz» in diesen Schritten direkt aus der Praxis in die Forschung einfließen. Die zur Ausbildung der Anschlüsse erforderlichen mechanischen Verbindungsmittel, die an der Prozesskette beteiligten Firmen lieferten eine hohe Eigenleistung zur Realisierung des Projektes. Für das Forschungsprojekt wurden ca. 197 m³ Buchenholz im Forst eingeschnitten, zu ca. 60 m³ Buchenvoll- oder -brettschichtholz weiterverarbeitet. Die Forschungsergebnisse basieren auf insgesamt über 600 durchgeführten Prüfungen. Die erreichten Ergebnisse können den folgenden Berichten zu den einzelnen Modulen

- Katalog relevanter Anschlüsse
- Experimentelle Untersuchungen zu mechanischen Verbindungen
- Erarbeitung von Bemessungsregeln

und Verbindungsmitteln

- Stabdübeln/Passbolzen
- Schrauben
- Eingeklebten Gewindestangen

entnommen werden.



Abb. 4: Aufbereitung des Stammholzes mit Einschnitt und Lufttrocknung an der Berner Fachhochschule (v.l.n.r.)

5 Literatur

Brändli, U.-B. (2010): Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der dritten Erhebung 2004-2006. Bundesamt für Umwelt, BAFU, Bern.

Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald Schnee und Landschaft (2010): Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der dritten Erhebung 2004 -2006, Birmensdorf

Gross, D., Schmutz, A. (2010): Jahrbuch Wald und Holz. Bundesamt für Umwelt, BAFU, Bern.

Steiger R., Frangi A., Kobel P. (2013): Schlussbericht WHFF-Projekt 2011.17: Brettschichtholz aus Laubholz - Marktimplementierung als Bauprodukt.

Zarnani, P., Quenneville, P. (2013): Wood load-carrying capacity of timber connections: An extended application for nails and screws, Materials and Joints in Timber Structures, RILEM Bookserie 9, Springer Verlag, Germany

Modul 1

Katalog von Anschlüssen in Laubholzkonstruktionen

Autoren: Steffen Franke, Bettina Franke

Mitarbeitende: Elisabeth Naderer

Berner Fachhochschule, Institut für Holzbau, Tragwerke und Architektur

Inhalt

1 Einführung.....	3
2 Beanspruchungsarten - Verbindungsarten.....	4
3 Übersicht der bewerteten Verbindungen	6
4 Bemessungsrelevante Details der einzelnen Verbindungen je Verbindungsart/Verbindungsmittel ..	7
5 Annahmen, Grundlagen und Diskussionen zum Versuchsprogramm.....	16
6 Literatur.....	24
A Katalog der einzelnen Verbindungen je Verbindungsart/Verbindungsmittel	27
B Begriffe und Definitionen zu den Verbindungsmitteln	46
C Festigkeitskennwerte für Laubholz	48

1 Einführung

Das Modul 1 des Forschungsvorhabens zu Anschlüssen in Buchenholz bildete die Ausgangslage des Projektes und wurde in drei interne Modulevaluierungsstufen gegliedert. Für die erste Evaluierung erfolgte eine Auslegeordnung von Anschlüssen für Laubholzkonstruktionen für den mehrgeschossigen Wohnungsbau, den Bau öffentlicher Gebäude wie auch für weitspannende Konstruktionen im Bereich von Sport-, Lager- und Industriehallen. Für eine praxisnahe Evaluierung ist die Bewertung durch eine Umfrage bei schweizerischen Holzbaufirmen und anerkannten Experten sowie die Durchführung eines Austausches mittels Workshop erfolgt.

Basierend auf dem Ergebnis der ersten Evaluierung ist die Detailerarbeitung und Darlegung der bemessungsrelevanten Ansätze, Methoden und Parameter zu den relevanten Anschlüssen in Laubholz durchgeführt wurden. Die Evaluierung des erreichten Detail-Kataloges erfolgte dann mit Hilfe der im Projekt mitwirkenden Firmen/Praxispartner und dem Expertengremium. Die dritte Stufe bildete die Erarbeitung der erforderlichen Kennwerte und Prüferserien für die gewählten Anschlüsse sowie deren wissenschaftliche Bewertung. Auch hier ist eine Evaluierung durch die beteiligten Forschungsinstitutionen und das Expertengremium erfolgt.

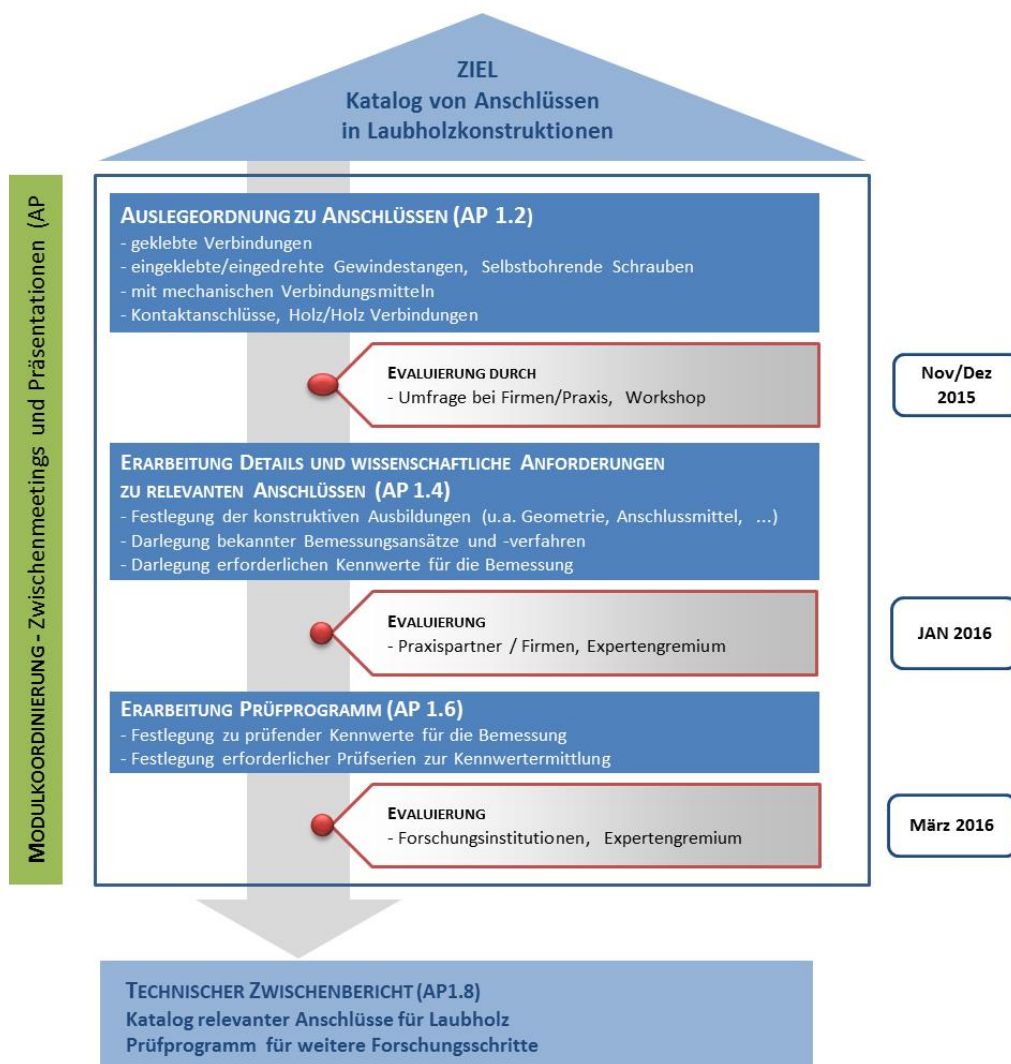


Abb. 1: Gliederung des Modul 1 innerhalb des Forschungsprojektes Anschlüsse in Buchenholz

2 Beanspruchungsarten - Verbindungsarten

2.1 Konstruktionsanalyse, neuralgische Punkte

Für die Herleitung relevanter Verbindungen für Laubholzkonstruktionen wurden die typischen Konstruktionsarten

- Einfeldträger/Durchlaufträger
- Rahmentragwerke z. B. für Hallenkonstruktionen
- Fachwerke z. B. für Dachkonstruktionen
- Pfosten/Riegelkonstruktion z. B. für mehrgeschossige Wohnungs-/Bürogebäude
- Flächentragwerke

analysiert. In Abb. 2 sind die möglichen vorhandenen Anschlusspunkte als neuralgische Punkte für ausgewählte Konstruktionsarten gekennzeichnet. Die Anschlusspunkte gliedern sich nach ihrer Beanspruchung wie folgt:

- Zug-/Druckanschluss (parallel zur Faser und unter einen Winkel zur Faser)
- Biegesteifer Anschluss/Momentenanschluss
- Querkraftanschluss (überwiegend) als Haupt-Nebenträgeranschluss
- Querkraftanschluss, inkl. Verstärkung
- Querkraftanschluss, inkl. Auflager und Verstärkung.

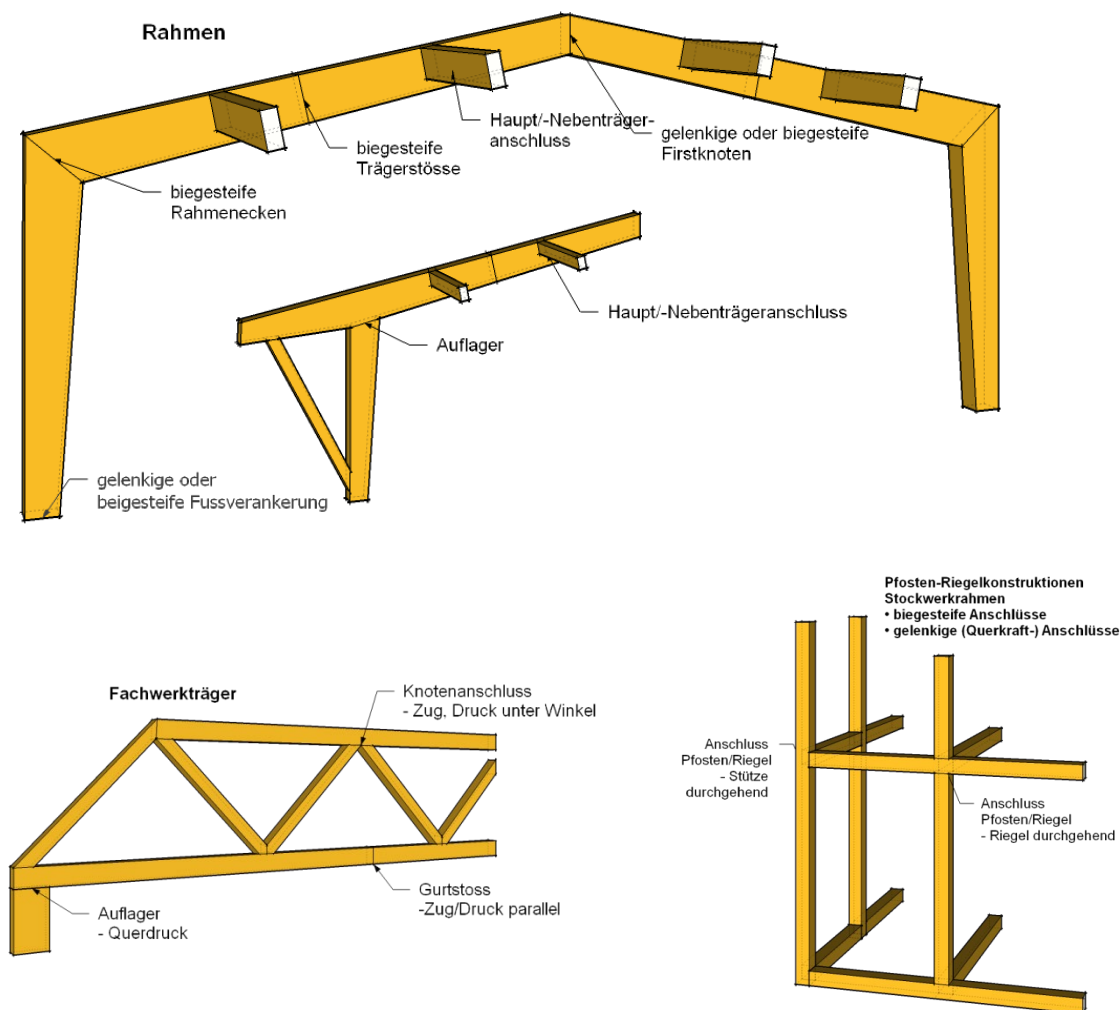


Abb. 2: Konstruktionsanalyse mit Kennzeichnung der neuralgischen Punkte

2.2 Matrix der Verbindungen als Übersicht

Den Kategorien der Anschlusspunkte nach Beanspruchungsart wurden die verschiedenen Verbindungsarten respektive Verbindungsmittel in einer Matrix gegenübergestellt. Tab. 1 zeigt die Matrix der Verbindungen mit Kennzeichnung der Realisierung.

Tab. 1: Verbindungsart/-mittel gegenüber Beanspruchung

	Geklebte Verbindung	Eingeklebte Gewinde- stangen	Selbstbohrende Schrauben/ Eingedrehte Gewinde- stangen	Nagel-/ Schrauben- verbindung	Stabdübel/ Passbolzen/ Dübel bes. Bauart	System- verbinder	Kontakt- anschlüsse
Zug/Druck (, \nless zur Faser)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Moment	✓	✓	-	✓	✓	-	-
Querkraft (Haupt-Neben- trägeranschluss)	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Querzug, Verstärkung	✓	✓	✓	-	-	-	-
Querdruck, Auflager, Verstärkung	-	✓	✓	-	-	-	-

Als Bewertungskriterien steht an erster Stelle das:

- Potential für die praktische Anwendung im Laubholzbereich
- Tragfähigkeit und Ausnutzungsgrad
- Nachgiebigkeit und Duktilität

Dennoch sollten die gängigen weiteren Nebenkriterien nicht ganz aussen vorgelassen werden:

- Herstellung
- Transport
- Montage
- Brandschutz
- Ästhetik

Die im Einzelnen diskutierten Verbindungen und Stösse sind im Anhang A aufgeführt. Neben den Skizzen sind die Bewertungsboxen und Kommentare aus den Workshops dort tabellarisch aufgeführt. Zur Begriffsklärung sind im Anhang B die mechanischen Verbindungsmittel mit den berücksichtigten Geometrien und Ausführungen aufgeführt.

3 Übersicht der bewerteten Verbindungen

Tabelle 2 stellt resultierend aus den Bewertungen und Diskussionen eine Übersicht der Relevanz der Verbindungen dar. Die geklebten Verbindungen werden für das Projekt generell mit geringer Relevanz sowie die Nagelverbindungen mit keiner Relevanz bewertet und in der weiteren Bearbeitung nicht betrachtet.

Für selbstbohrende Schrauben, eingedrehte und eingeklebte Gewindestangen werden die Verbindungen auf Zug/Druck und die Verstärkungen (Querzug und Querdruck) mit hoher Priorität eingestuft und im Projekt weitergeführt. Für Stabdübel und Passbolzenverbindungen werden die Zug/Druck- und Momentenverbindungen, bei Kontaktanschlüssen Zug/Druck- und Querkraftverbindungen priorisiert und zu diesem Zeitpunkt weiterhin betrachtet. Mit einer mittleren Relevanz (2) werden die Querkraftanschlüsse in Form von Systemverbindern, mit den jeweiligen benötigten Verbindungsmitteln, eingestuft und im Zuge des Projekts teilweise betrachtet.

Daraus ergibt sich die Notwendigkeit der Erarbeitung der bemessungsrelevanten Details und Anforderungen für Verbindungen mit folgenden Verbindungsmitteln, welche im nachfolgenden Abschnitt dargestellt sind:

- Eingeklebte Gewindestangen
- Lange Schrauben (selbstbohrend bzw. vorgebohrt) und eingedrehte Gewindestangen
- Kurze Schrauben (ohne vorbohren, selbstbohrend)
- Stabdübel/Passbolzen
- Kontaktanschlüsse

Tab. 2: Bewertete Verbindungsart/-mittel gegenüber der Beanspruchung

Beanspruchung \ Anschluss	Geklebter Anschluss	Eingeklebte Gewindestangen	Eingedrehte Gewindestangen	Schrauben	Stabdübel, Passbolzen	Systemverbinder	Versatz/Kontaktanschluss
Zug/Druck (, & zur Faser)	1	3	3	2	3	0	3
Moment	1	3	-	0	3	-	-
Querkraft (Haupt-/Nebenträger)	-	1	2	2	2	2	3
Querzug, inkl. Verstärkung	0	3	3	-	-	-	-
Querdruck, inkl. Verstärkung	-	3	3	-	-	-	-

4 Bemessungsrelevante Details der einzelnen Verbindungen je Verbindungsart/Verbindungsmittel

4.1 Eingeklebte Gewindestangen

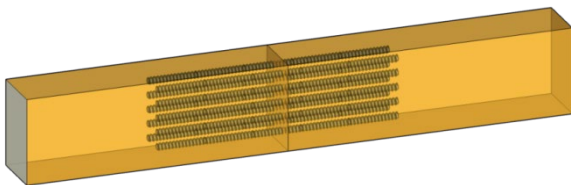
4.1.1 Tragwirkung und Versagensverhalten

Eingeklebte Gewindestangen sind hauptsächlich für die Übertragung von Zug- bzw. Druckkräften vorgesehen. In Abb. 3 sind die im Workshop festgelegten relevanten Verbindungen zu eingeklebten Gewindestangen in Prinzipskizzen aufgezeigt. Auftretende Momente werden in eine Zug- und Druckbeanspruchung aufgeteilt. Auftretende Querkkräfte werden über die Lochleibung und den Stahlquerschnitt abgetragen. Die Zugkräfte werden über die Klebefuge vom Holzquerschnitt in die Gewindestange eingeleitet. Je nach Anschlussstyp werden die Gewindestangen parallel (z. B. Zugstab), geneigt oder senkrecht zur Faser (z. B. Querkzug- und Querkdruckverstärkung) eingebracht. Folgende Versagensmechanismen können auftreten:

- Versagen der Gewindestange
- Versagen Klebefuge bzw. des Holzes entlang der Bohrlochwandung
- Versagen des Holzbauteils
- Ausknicken

Daraus ergeben sich die entsprechenden Nachweise. Zudem muss der Verbund zwischen Holz und Stab sichergestellt werden und die Festigkeit der Klebefuge ausreichend gross sein. Bei der Verwendung von Verbindungsmittelgruppen muss der Gruppentrageffekt beachtet werden. Die jeweiligen Achs- und Randabstände beeinflussen das Tragverhalten. Aufspalten kann durch Querkzugverstärkungen verhindert werden. Die Tragfähigkeit quer zur Stabachse ist, neben der Materialbeschaffenheit des Stabes, abhängig von der Lochleibungsfestigkeit $f_{h,k}$, des Kraftfaserwinkels α , des Stabdurchmessers d und der geometrischen Zusammensetzung der Verbindung.

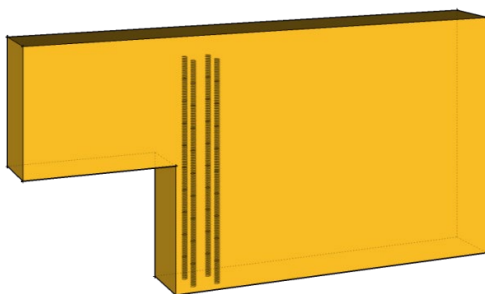
Zugstabverlängerung



Rahmenecke



Querkzugverstärkung



Querkdruckverstärkung

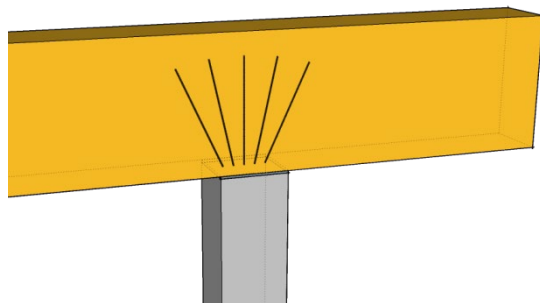


Abb. 3: Prinzipskizzen zu Anschlüssen mit eingeklebten Gewindestangen

4.1.2 Vorhandene Bemessungsgrundlagen

In der **SIA 265:2012** werden keine Angaben zur Berechnung von auf Zug beanspruchten eingeklebten profilierten Stäben gemacht. Die Tragfähigkeit der Verbindung in Bezug auf ihren Auszugwiderstand muss durch Versuche ermittelt werden. Als Versagensmechanismen werden die oben genannten angegeben. Der Auszieh Widerstand variiert je nach Geometrie (Loch- und Stabdurchmesser, Profilierung, Rand- und Achsabstände), Material (Stahlgüte) und Einklebelänge des Stabes. Des Weiteren beeinflussen die Klebstoffeigenschaften sowie Beschaffenheit des Holzes (Holzart, Festigkeitsklasse, Holzfeuchte, Rohdichte) die Tragfähigkeit der Verbindung. Bei einer Gruppe von Verbindungsmitteln kann von einer gleichmässigen Kraftverteilung ausgegangen werden, wenn eine ausreichende Duktilität vorherrscht.

Die **EN 1995-1-1:2004 (Eurocode 5)** gibt weitere Angaben zur Berechnung von eingeklebten profilierten Stäben. Dabei wird die Ausziehtragfähigkeit ermittelt, wo die Streckgrenze und Querschnittsfläche des Stahlstabs sowie dessen Einklebelänge und der Bemessungswert der Klebefugenfestigkeit einfliesst. Die Randabstände liegen bei $a_2 = 5d$ (parallel zur Faserrichtung) und $a_1 = a_2 = 4d$ (rechtwinklig zur Faserrichtung), die Achsabstände bei $a_{1,c} = a_{2,c} = 2,5d$. Bei der Verwendung eingeklebter Gewindestangen zur Querkzugverstärkung ist der Nachweis der Klebefugenspannung zu führen. Die Spannung der Klebefuge ist abhängig von der auf den Stab wirkenden Zugkraft sowie dessen Durchmesser und dessen Einbindelänge.

$$F_{ax,Rd} = \min \left\{ f_{y,d} \cdot A_{ef} \right. \\ \left. \pi \cdot d \cdot l_{ad} \cdot f_{k1,d} \right\} \quad (1)$$

Mit:

- $f_{y,d}$ Bemessungswert der Streckgrenze des Stahlstabes;
- A_{ef} der Spannungsquerschnitt des Stahlstabes;
- l_{ad} Einklebelänge des Stahlstabes; $l_{ad,min} = \{0.5d^2; 10d\}$
- d Nenndurchmesser des Stahlstabes;
- $f_{k1,d}$ Bemessungswert der Klebefugenfestigkeit mit $f_{k1,k}$ nach Tabelle NA.12.

Die **DIN V ENV 1995-2:1997** gibt die Berechnung des Kurzzeitverschiebungsmoduls an, welcher vom Stabdurchmesser und der Dichte des Holzes abhängig ist. Die Langzeitbetrachtung ist nicht enthalten.

4.1.3 Relevante Untersuchungskennwerte und -parameter

Resultierend aus der Tragwirkung, den Versagensarten und Nachweisverfahren ergeben sich folgende zu bestimmende Kennwerte bzw. Untersuchungsparameter:

<input checked="" type="checkbox"/>	Lochleibungsfestigkeit	1. Allgemeine Einflüsse
<input checked="" type="checkbox"/>	Verschiebungsmodul K_{ser}	<ul style="list-style-type: none"> Versuchsaufbau (Druck-Zug; Zug-Zug) Verstärkungen zur Reduktion der Spaltgefahr/Ausknicken
<input checked="" type="checkbox"/>	Auszieh Widerstand	<ul style="list-style-type: none"> Stahlfestigkeit Klebstoffeigenschaften Holz-Rohdichte
<input checked="" type="checkbox"/>	Eindrückwiderstand	
<input checked="" type="checkbox"/>	Mindestabstände	2. Betreffe Auszieh- und Eindrückwiderstände
<input checked="" type="checkbox"/>	Mindestdicke/-einbindelänge	<ul style="list-style-type: none"> Durchmesser Einbindelänge Kraftfaserwinkel Rand- und Achsabstände Klebefugenfestigkeit
<input checked="" type="checkbox"/>	Gruppeneffekte	
<input checked="" type="checkbox"/>	Verstärkungen	3. Betreffe Lochleibungsfestigkeit
<input type="checkbox"/>	Weiteres	<ul style="list-style-type: none"> Durchmesser Kraftfaserwinkel Rand- und Achsabstände

4.2 Schrauben und eingedrehte Gewindestangen (kurze Schrauben - ohne vorbohren, lange Schrauben - selbstbohrend bzw. vorgebohrt)

Die Evaluation von Verbindungen mit Schrauben und eingedrehten Gewindestangen ergab, dass Verbindungen mit kurzen Schrauben ($l \leq 200$ mm) ohne vorbohren ausgeführt werden sollten und Verbindungen mit langen Schrauben ($l > 200$ mm) und Gewindestangen mit vorbohren ausgeführt werden können. Weiterhin liegt der Fokus auf Holz-Stahlblechverbindungen. Da sich das Trag- und Versagensverhalten mit diesen Verbindungsmitteln nicht unterscheidet, werden beide Gruppen in diesem Abschnitt zusammen behandelt.

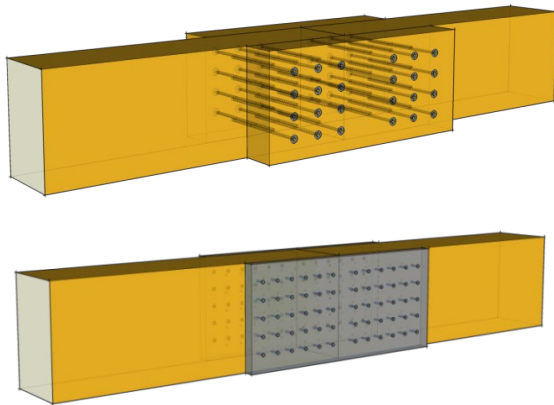
4.2.1 Tragwirkung und Versagensverhalten

Schrauben und eingedrehte Gewindestangen weisen hauptsächlich zwei Beanspruchungsrichtungen auf, in Schafrichtung (Zug- und Druckkomponenten) und quer zur Schafrichtung (Querkraft). Durch geneigte bzw. kreuzweise angeordnete Schrauben ($\alpha < 45^\circ$) können Abscher- bzw. Querkraften in Zugkräfte bzw. Zug- und Druckkomponenten in Schafrichtung umgewandelt werden. Als Querkraft- und Querkraftverstärkung ($\alpha = 90^\circ$) ergeben sich überwiegend Zug- und Druckkräfte in Schafrichtung. Die Widerstände sind abhängig vom Durchmesser d der Einbindelänge l_{ef} und dem Kraft-Faserwinkel α . Die Tragfähigkeit quer zur Stabachse ist, neben der Materialbeschaffenheit des Stabes, von der Lochleibungsfestigkeit $f_{h,k}$, des Kraftfaserwinkels α , des Stabdurchmessers d und der geometrischen Zusammensetzung der Verbindung.

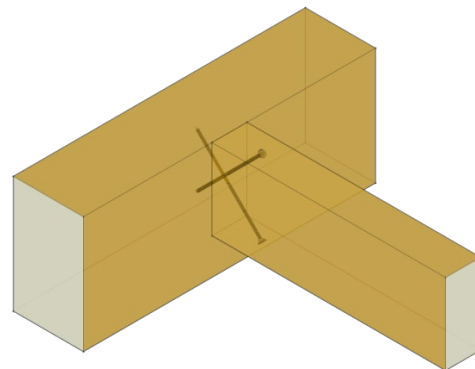
Folgende Versagensmechanismen können auftreten:

- Abscheren des Gewindestabs bzw. der Schraube
- Versagen des Holzbauteils auf Lochleibung
- Versagen des Gewindestabs bzw. der Schraube auf Zug oder Druck
- Auszug bzw. Ausknicken des Gewindestabs bzw. der Schraube
- Versagen des Holzbauteils auf Zug/Druck

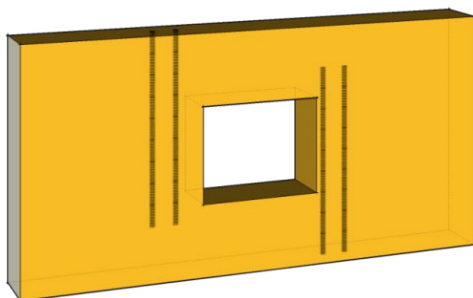
Zugstabanschluss



Haupt-Nebenträgeranschluss mit schräg eingebrachten Schrauben



Querkraftverstärkung



Querkraftverstärkung

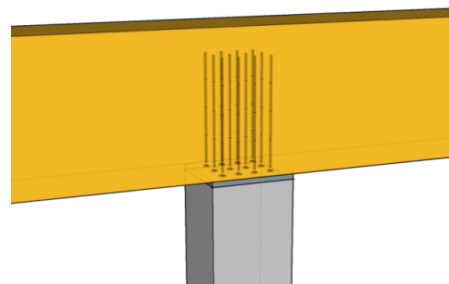


Abb. 4: Prinzipskizzen zu Anschlüssen mit Schrauben und eingedrehten Gewindestangen

4.2.2 Vorhandene Bemessungsgrundlagen

In der **SIA 265:2012** ist die Berechnung von Schrauben für die Beanspruchung in Schafrichtung gegeben. Für die Schrauben sind die Nachweise, das Ausziehen des Gewindeteils der Schraube, das Abreißen und Durchziehen des Schraubenkopfs, das Zugversagen der Schraube, das Knicken der Schraube bei Druckbeanspruchung und das Ausscheren eines Holzteils zu führen. Der Bemessungswert der Ausziehtragfähigkeit setzt sich aus dem Schraubendurchmesser, der Einbindelänge der Schraube und dem Bemessungswert der Scherfestigkeit (resultierend aus dem charakteristischen Wert der Ausziehfestigkeit rechtwinklig zur Faserrichtung und dem Kraft-Faserwinkel) zusammen. Die Berechnungen in **EN 1995-1-1:2004** gleichen der SIA265:2012.

Die Angaben der **Schraubenhersteller** enthalten Berechnungsgrundlagen zum Schraubenauszug, Kopfdurchziehewiderstand und Rand- und Mindestabstände. Darüber hinaus geben sie die Berechnung der Knicklast von auf Druck belasteten Schrauben.

In der **SIA 265:2012** sind keine Bemessungsgrundlagen zur Anwendung von selbstbohrenden Schrauben/eingedrehten Gewindestangen als Querkzug-/Querkdruckverstärkung vorhanden. Nach **EN 1995-1-1:2004** sind Holzschrauben zur Verstärkung zulässig. Berechnungsgrundlagen sind nicht gegeben. Gemäss den Angaben der **Schraubenhersteller** (Würth, SFS, SPAX) ist die Auszugtragfähigkeit der Schraube mit der auftretenden Zugkraft zu vergleichen. Würth gibt zudem den Verschiebungsmodul für in Achsrichtung beanspruchte Schrauben und Abhängigkeit des Schraubendurchmessers und der Einbindelänge an.

Bei Querkdruckverstärkungen errechnet sich die Tragfähigkeit aus dem kleineren Wert des Auszugwiderstands und der Knicklast der Schrauben. Für deren Berechnung wird die Querkdruckfestigkeit des Holzes und der Bemessungswert der Ausziehewiderstands benötigt. In die Berechnungen der Tragfähigkeit fliessen der Durchmesser, die Einbindelänge, die Auflagerabmessungen, die Rand- und Achsabstände sowie die Bettung der Schraube im Holzquerschnitt ein.

4.2.3 Relevante Untersuchungskennwerte und -parameter

Resultierend aus der Tragwirkung, den Versagensarten und Nachweisverfahren ergeben sich folgende Untersuchungen bzw. Untersuchungsparameter:

<input checked="" type="checkbox"/>	Lochleibungsfestigkeit	1. Allgemeine Einflüsse
<input checked="" type="checkbox"/>	Verschiebungsmodul K_{ser}	<ul style="list-style-type: none"> • Vorbohren, selbstbohrend, Vorbohrdurchmesser • Versuchsaufbau (Druck-Zug; Zug-Zug) • Verstärkungen zur Reduktion der Spaltgefahr/Ausknicken • Stahlfestigkeit, Schraubenart • Rohdichte
<input checked="" type="checkbox"/>	Ausziehewiderstand	2. Betreffe Auszieh- und Eindrückewiderstände (lange Schrauben und Gewindestangen)
<input checked="" type="checkbox"/>	Eindrückewiderstand	<ul style="list-style-type: none"> • Durchmesser • Einbindelänge • Kraftfaserwinkel • Rand- und Achsabstände
<input checked="" type="checkbox"/>	Mindestabstände	3. Betreffe Lochleibungsfestigkeit (kurze Schrauben)
<input checked="" type="checkbox"/>	Mindestdicke/-einbindelänge	<ul style="list-style-type: none"> • Durchmesser • Kraftfaserwinkel • Mindest-, Rand- und Achsabstände
<input checked="" type="checkbox"/>	Gruppeneffekte	
<input checked="" type="checkbox"/>	Verstärkungen	
<input type="checkbox"/>	Weiteres	

4.3 Stabdübel/ Passbolzen

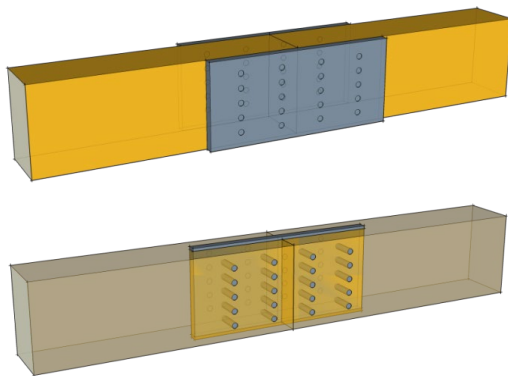
4.3.1 Tragwirkung und Versagensverhalten

Die Verbindung beruht auf dem Übertrag von Zug-, Druck- oder Querkraften durch Belastung der Verbindungsmittel auf Abscheren und des Holzes auf Lochleibung. Die Tragfähigkeit ist abhängig von der Materialbeschaffenheit des Verbindungsmittels, der Lochleibungsfestigkeit $f_{h,k}$ des Holzes, des Kraftfaserwinkels α , der Stabdurchmesser d und der geometrischen Zusammensetzung der Verbindung. Für eine Gruppe von Verbindungsmitteln ist die effektiv wirksame Anzahl von Verbindungsmitteln zu bestimmen. Zur Verminderung der Spaltgefahr und für den Ansatz der vollen Tragfähigkeit müssen die Rand- und Achsabstände der Verbindungsmittel eingehalten werden. Verstärkungen mit quer eingedrehten Schrauben sind möglich.

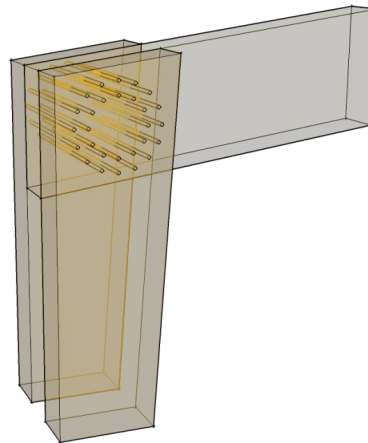
Folgende Versagensmechanismen können auftreten:

- Abscheren des Verbindungsmittels
- Versagen des Holzbauteils auf Lochleibung

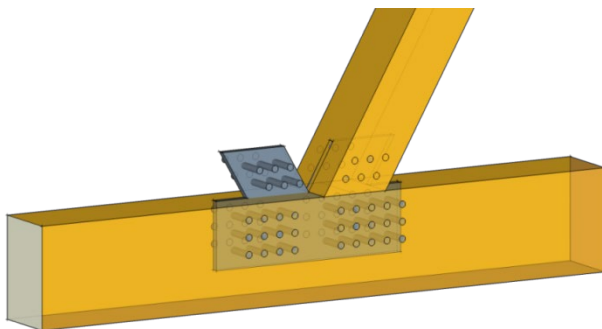
Zugstabanschluss



Rahmenecke, Dübelkreis mit Stabdübeln/Bolzen



Fachwerkknoten



Haupt-Nebenträgeranschluss

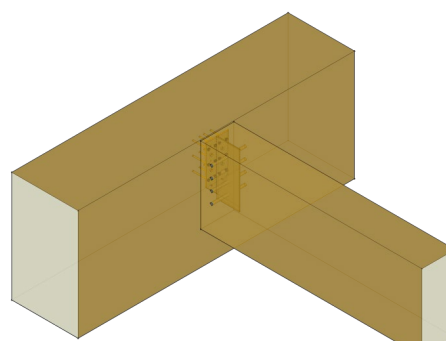


Abb. 5: Prinzipskizzen zu Anschlüssen mit Schrauben und eingedrehten Gewindestangen

4.3.2 Vorhandene Bemessungsgrundlagen

In der **SIA 265:2012** und im **EN 1995-1-1:2004** wird die Stabdübel-/Passbolzenverbindung mit Hilfe der Johansen Theorie bemessen. In die Berechnung gehen das Flie遨moment der Schraube und die Lochleibungsfestigkeit des Holzes ein. Die Tragfähigkeit kann durch die Addition der Tragfähigkeit auf Herausziehen vergrößert werden. Für die Verbindungen sind Mindestholzdicken, Rand- und Achsabstände einzuhalten. Neben den Tragfähigkeiten sind zudem die zugehörigen Verschiebungsmoduli angegeben. Diese sind von der Rohdichte des Holzes und dem Durchmesser des Stahlstabs abhängig.

4.3.3 Relevante Untersuchungskennwerte und -parameter

Resultierend aus der Tragwirkung, den Versagensarten und Nachweisverfahren ergeben sich folgende zu bestimmende Kennwerte bzw. Untersuchungsparameter:

<input checked="" type="checkbox"/>	Lochleibungsfestigkeit	<p>1. Allgemeines</p> <ul style="list-style-type: none"> • Stahlfestigkeit, Oberflächengüte • Versuchsaufbau (Druck-Zug; Zug-Zug) • (Verstärkungen zur Reduktion der Spaltgefahr) • Rohdichte <p>2. Lochleibung</p> <ul style="list-style-type: none"> • Durchmesser • Kraftfaserwinkel • Mindest-, Rand- und Achsabstände
<input checked="" type="checkbox"/>	Verschiebungsmodul K_{ser}	
<input type="checkbox"/>	Auszieh Widerstand	
<input type="checkbox"/>	Eindrückwiderstand	
<input checked="" type="checkbox"/>	Mindestabstände	
<input checked="" type="checkbox"/>	Mindestdicke/-einbindelänge	
<input checked="" type="checkbox"/>	Gruppeneffekte	
<input type="checkbox"/>	Verstärkungen	
<input type="checkbox"/>	Weiteres	

4.4 Systemverbinder

4.4.1 Tragwirkung und Versagensverhalten

Systemverbinder als vorproduzierte meist ein- oder zweiteilige Metallverbinder sind jeweils für einen engen Anwendungsbereich konzipiert. Die Bewertung zu relevanten Anwendungen ergab ein Fokus auf Verbinder für Haupt-Nebenträgeranschlüsse. Die jeweiligen Verbinder bzw. Verbinderteile werden direkt oder in Aussparungen durch Schrauben befestigt und gegenseitig verbunden (eingehangen). Die Schrauben können entweder gerade oder geneigt eingebracht werden. Die Verbindungsmittel werden somit auf Abscheren bzw. Herausziehen beansprucht.

Bei einteiligen Verbindern werden Nebenträger mittels Stabdübeln angeschlossen. Hier erfolgt die Lastweiterleitung rein durch Belastungen quer zum Verbindungsmittel (Abscheren). Die Tragwirkungen sind in Kapitel 4.2.2 Schrauben und Kapitel 4.3.2 Stabdübel/Passbolzen bereits beschrieben.

Folgende Versagensmechanismen können auftreten:

- Abscheren der Verbindungsmittel
- Versagen des Holzbauteils auf Lochleibung
- Versagen der Schraube auf Zug
- Versagen der Schraube auf Herausziehen, Kopfdurchziehen
- Versagen des Verbinders

4.4.2 Vorhandene Bemessungsgrundlagen

Tragfähigkeiten und Nachweise sind durch die Hersteller angegeben. Hierbei sind der Verbinder und die Verbindungsmittel relevant. Nachweise, Grundlagen und Kennwerte der Verbindungsmittel sind bereits in Kapitel 4.2 ff aufgeführt.

4.4.3 Relevante Untersuchungskennwerte und -parameter

Die notwendigen Untersuchungsparameter sind über das Kapitel 4.2.2 Schrauben und Kapitel 4.3.2 Stabdübel/Passbolzen bereits abgedeckt.

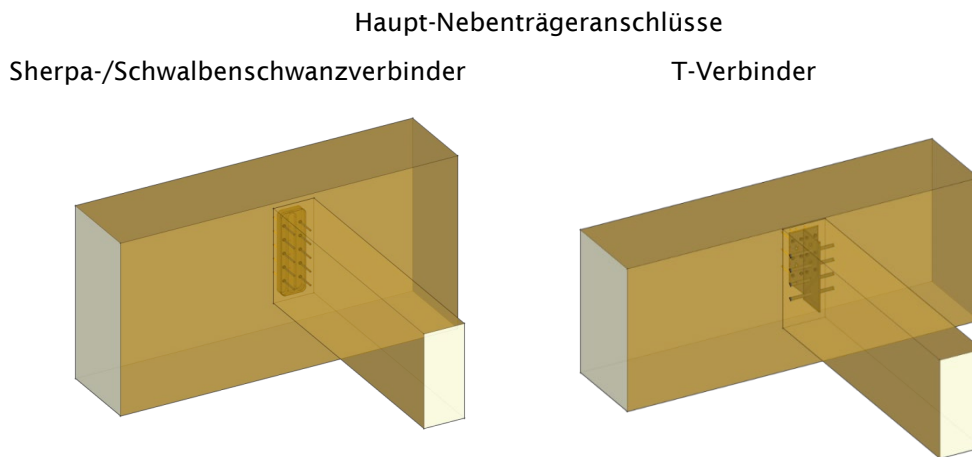


Abb. 6: Prinzipskizzen zu Anschlüssen mit Systemverbindern

4.5 Kontaktanschlüsse/ Holz-Holz Verbindungen

4.5.1 Tragwirkung und Versagensverhalten

Die Strebenkraft in *Versätzen* wird hauptsächlich über die Stirnfläche(n), bestimmt durch die Einbinde-tiefe, von der Strebe in die Schwelle eingeleitet und führt zu einer Druck- und Schubbeanspruchung in der Schwelle. Zur Übertragung der Schubbeanspruchung ist eine ausreichend grosse Vorholzlänge vorzusehen. Eine Übertragung von Zugkräften ist nicht möglich. Zur Lagesicherung sind zusätzliche Massnahmen in Form von Nägeln, Bolzen, Laschen oder ähnlichem anzuordnen.

Die *Schwalbenschwanzverbindung* kann Querkkräfte übertragen und wird als Verbindung zwischen Haupt- und Nebenträgern eingesetzt. Der Anschluss des Nebenträgers erfolgt über ein sich verjüngende selbstsichernde Aussparung. An der Stirnseite des Nebenträgers wird das Gegenstück herge-stellt. Der Nebenträger wird in den Hauptträger eingehangen. Die Querkraft wird über die Kontaktflä-che übertragen. Im Hauptträger entstehen zudem auch Querzugbeanspruchungen.

Die Tragfähigkeit von Holz/Holzverbindungen ist hauptsächlich durch Druckkraftübertragungen ge-kennzeichnet und die Materialkennwerte (Druck-, Schubfestigkeiten) von grosser Bedeutung. Durch die Berücksichtigung verschiedener Rohdichten kann eine Variation der Festigkeitsparameter erreicht werden. Neben den Materialparametern nehmen die geometrischen Gegebenheiten Einfluss auf die Tragfähigkeit. Folgende Versagensmechanismen können auftreten:

- Versagen auf Druck in den Kontaktflächen
- Versagen auf Schub im Vorholz (Versätze)
- Versagen infolge Querzug (Schwalbenschwanzanschluss)

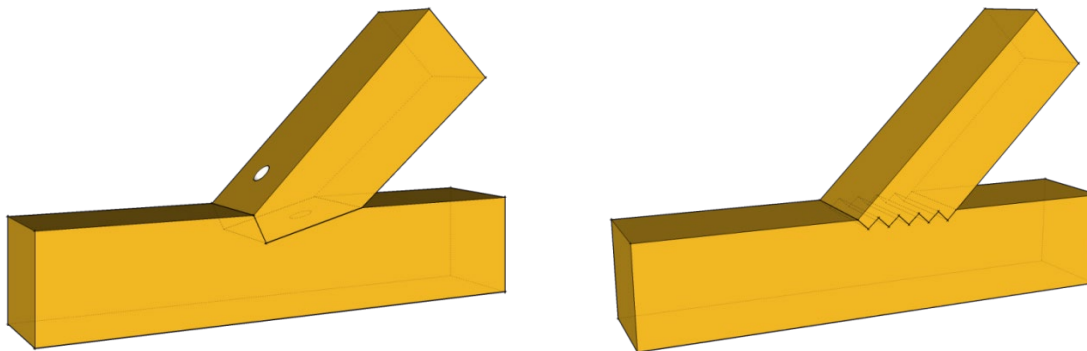
4.5.2 Vorhandene Bemessungsgrundlagen

Versätzen können gleichlautend nach den Normen **SIA 265:2012** und **EN 1995-1-1:2004** bemessen werden. Für den Nachweis wird die Druckfestigkeit für den Holz-Holz-Stoss unter dem jeweiligen Kraft-Faserwinkel nachgewiesen. Neben dem Nachweis zur Aufnahme der Druckkraft sind zusätzlich geometrische Randbedingungen einzuhalten. Die Anforderungen beziehen sich auf Mindestwerte der Einschnitttiefe und Vorholzlänge. Zudem muss bei dieser Verbindung die Lagesicherheit gewährleistet werden.

Die Bemessung von Schwalbenschwanzverbindungen ist in der bauaufsichtlichen Zulassung **BAZ Z-9.1-649** geregelt. Die Bemessungsmethode der Zulassung geschieht in Anlehnung an die Bemessung von Zapfenverbindungen nach Eurocode 5. Gemäss den Versagensmechanismen werden die Querzug-tragfähigkeit und Schubtragfähigkeit der Verbindung ermittelt. Der kleinere Wert der beiden Tragfä-higkeiten ist massgebend. In die Berechnung gehen die geometrischen Gegebenheiten der Verbin-dung in Form der Zapfenhöhe, der Zapfenlochtiefe, des Zapfenradius sowie der Höhe und Breite des Hauptträgers ein.

Für Zapfenverbindungen sind in der **SIA 265:2012** keine Angaben zur Bemessung enthalten. Nach **EN 1995-1-1:2004** kann der charakteristische Wert der Zapfentragfähigkeit ermittelt werden. In die Berechnung fliessen die geometrischen Abmessungen des Zapfens in Form von Zapfenlänge, -breite und die Abstände des Zapfens zur Balkenaussenkante sowie die Querdruck- bzw. Schubtragfähigkeit des Holzes ein. Die Tragfähigkeit der Zapfenverbindung beschreibt den minimalen Wert der Schub- und der Querdrucktragfähigkeit.

Versätze - Druckanschlüsse



Schwalbenschwanzverbindung - Querkraftanschluss

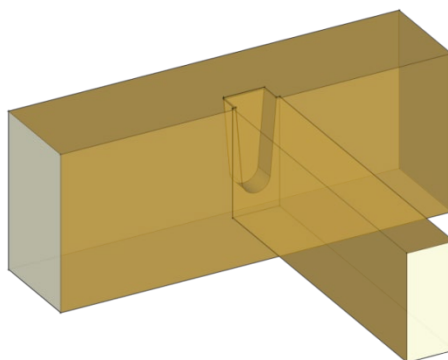


Abb. 7: Prinzipskizzen zu Kontaktanschlüssen

4.5.3 Relevante Untersuchungskennwerte und -parameter

Resultierend aus der Tragwirkung, den Versagensarten und Nachweisverfahren ergeben sich folgende Untersuchungen bzw. Untersuchungsparameter:

<input type="checkbox"/>	Lochleibungsfestigkeit	1. Allgemeines
<input checked="" type="checkbox"/>	Verschiebungsmodul K_{ser}	<ul style="list-style-type: none"> • Rohdichte
<input type="checkbox"/>	Auszieh Widerstand	2. Material
<input type="checkbox"/>	Eindrückwiderstand	<ul style="list-style-type: none"> • Druckfestigkeit • Schubfestigkeit • Querkzugfestigkeit
<input checked="" type="checkbox"/>	Mindestabstände	3. Geometrische Gegebenheiten
<input type="checkbox"/>	Mindestdicke/-einbindelänge	<ul style="list-style-type: none"> • Vorholzlänge • Einschnitttiefe • Anschlusswinkel/Strebenneigung • Abmessungen des Zapfens/Schwalbenschwanzes
<input type="checkbox"/>	Gruppeneffekte	
<input checked="" type="checkbox"/>	Verstärkungen	
<input checked="" type="checkbox"/>	Weiteres	

4.6 Zusammenfassung

Zusammenfassend ergeben sich in Abhängigkeit der Beanspruchungen folgende Untersuchungsparameter. Allgemein sind die **Rohdichte** aufzunehmen sowie Untersuchungen zu **Mindestrand- und Verbindungsmittelabstände** sowie **Mindestdicken** durchzuführen. Der **Verschiebungsmodul** wird generell bei allen Versuchen miterfasst und ausgewertet.

Auszugfestigkeit

Verbindung	Durchmesser	Einbindelänge	Kraftfaserwinkel	Weiteres
Eingeklebte Gewindestangen	$d = 12/16/20 \text{ mm}$	$l_{ef} = 8d, 10d, 15d$	$\alpha = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$	- Gruppeneffekt - nicht Stahlzugfestigkeit - nicht Klebefugenfestigkeit
Lange Schrauben/ Gewindestangen	$d = 13/16/20 \text{ mm SFS}$ $d = 10/14 \text{ mm Würth}$	$l_{ef} = 4d, 6d, 10d$	$\alpha = 0^\circ, 90^\circ$	- Gruppeneffekt - nicht Stahlzugfestigkeit
Kurze Schrauben (ohne Vorbohren)	$d = 6.5/8.2 \text{ mm SFS}$ $d = 6 \text{ mm Würth}$ $d = 8 \text{ mm Sherpa}$	$l_{ef} = 6d$	$\alpha = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 90^\circ$	

Lochleibungsfestigkeit

Verbindung	Durchmesser	Kraftfaserwinkel	Weiteres
Eingeklebte Gewindestangen	$d = 12/16/20 \text{ mm}$	$\alpha = 0^\circ, 90^\circ$	- wirksame Anzahl n_{ef} (sollte konstruktiv umgangen werden)
Lange Schrauben ¹⁾ und Gewindestangen ²⁾	$d = 10/12/14 \text{ mm}^{1)}$ $d = 16/20 \text{ mm}^{2)}$	$\alpha = 0^\circ \text{ bis } 90^\circ$ (0, 30, 45, 60, 90°)	- wirksame Anzahl n_{ef} - Verstärkungen gegen Spalten primär
Kurze Schrauben (ohne Vorbohren)	$d = 6-14 \text{ mm}$	$\alpha = 0^\circ \text{ bis } 90^\circ$ (0, 30, 45, 60, 90°)	- wirksame Anzahl n_{ef} (sollte konstruktiv umgangen werden)
Stabdübel/ Passbolzen	$d = 6-20 \text{ mm}$	$\alpha = 0^\circ, 90^\circ$	- wirksame Anzahl n_{ef} (sollte konstruktiv umgangen werden) - Verstärkungen gegen Spalten primär

Kontakt

Verbindung	
Versatz	- Stirn- und Fersenversatz - Einbindetiefe, $t_v = 20 - 60 \text{ mm}$ - Strebenneigung $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$
Schwalbenschwanz	- Konische Zapfengeometrie $\gamma_z = 10^\circ$ - Zapfenfräswinkel $\beta_z = 15^\circ$ (Verwendung gängiger Fräser) - Zapfenbreite $b_z = 6 - 12 \text{ cm}$ - Zapfenhöhenverhältnis $h_z/b_z = 2$

5 Annahmen, Grundlagen und Diskussionen zum Versuchsprogramm

5.1 Festgestellte Probleme in der Praxis

Während der Workshops und Diskussionen wurden folgende Probleme bei der Herstellung von Verbindungen angesprochen. Innerhalb der Voruntersuchungen zum Versuchsprogramm sollen diese Punkte betrachtet und Lösungen erarbeitet werden.

- Einbringen von selbstbohrenden Schrauben nur bis 200 mm möglich
- Bohrlochdurchmesser verändert sich durch Feuchteeintrag
- Verbrennung der Bohrwandung beim Vorbohren

5.2 Grobstruktur des Versuchsprogramms

Für eine effiziente Zielerreichung wurde in einen dynamischen Prozess folgende Grobstruktur des Versuchsprogrammes vorgeschlagen und von den Projektpartnern schrittweise bestätigt.

- Vorversuche zum Einbringverhalten von Schrauben und Gewindestangen (vorbohren, nicht vorbohren, Bohrdurchmesser) bzw. zur Festlegung von Randparametern (Rand- und VM-Abstände, Mindestdicken, Massnahmen für $n_{ef}=n$)
- Untersuchung ganzer praxistauglicher Verbindungen für verschiedene Anwendungsfälle unter Berücksichtigung der festgelegten Parameter zur Bewertung der Umsetzbarkeit und Tragfähigkeit sowie Darlegung unerwarteter Versagensmechanismen. Die Versuchsergebnisse dienen der Validierung des Tragmodells.
- Falls erforderlich: Untersuchungen zu festgestellten Problemen aus in Schritten 1 und bzw. bisher nicht bekannter Einflüsse oder neuer Randparameter
- Falls erforderlich: Untersuchungen zu fehlenden Parametern für eine variable Bemessung (Durchführung in Abhängigkeit der Zeit und des Budgets)

Der Fokus liegt auf den folgenden Anwendungsgebieten:

- Fachwerke
- Haupt-Nebenträger-Anschlüsse
- biegesteife Rahmenecken in aufgelöster Form (kein Dübelkreis)
- biegesteife Stösse (Momentenabtragung durch Druck-/Zugkomponenten)
- Träger-Stützenanschlüsse

Momente werden für eine effektive Kraftübertragung in Zug- und Druckkomponenten aufgeteilt. Für die zu prüfenden Verbindungen ergeben sich daraus Beanspruchungen aus Zug/Druck und Querkraft.

5.3 Entwurfsgrundsätze und Tragmodell

Der Bemessung von Scherverbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln für Bauteile aus Buchenholz wird, das vereinfachte starr-plastisches Tragmodell gemäss Norm SIA 265:2012 zugrunde gelegt. Das Tragmodell setzt voraus, dass spröde Versagensarten mit geringen Verformungen (Aufspalten, Abscheren, Blockscheren, Zugbruch oder einer Kombination davon) durch die fachgerechte konstruktive Auslegung der Verbindung und das Einhalten von Mindestholzdicken und Mindestabständen ausgeschlossen werden. Zudem wird beim Tragsicherheitsnachweis der Verbindung mit dem Reduktionsbeiwert k_{red} die ungleichmässige Kraftverteilung zwischen mehreren in Krafrichtung hintereinander angeordneten stiftförmigen Verbindungsmitteln und die damit verbundene Verminderung des Tragwiderstandes durch ein frühzeitiges Aufspalten berücksichtigt.

Im Entwurf ist grundsätzlich ein duktilen Versagen anzustreben. Sind mehrere Verbindungsmittel in Krafrichtung hintereinander angeordnet, erfolgt die Kraftverteilung ungleichmässig auf die verschiedenen Verbindungsmittel. Bereits geringste Herstellungstoleranzen zwischen den Fügeteilen führen zu ungleichmässiger Belastung der Verbindungsmittel. Ein gewisser Kraftausgleich ist möglich, wenn das Versagen der Verbindung erst nach grösseren plastischen Verformungen - d. h. duktil - erfolgt.

Das Lochleibungsverhalten von Holz ist nicht genügend duktil, um den Kraftausgleich zu ermöglichen. Die Verformungen müssen deshalb in den Verbindungsmitteln erfolgen. Die Verbindung ist daher so auszulegen, dass in den Verbindungsmitteln vor dem Versagen plastische Verformungen eintreten, z. B. durch Verwendung relativ schlanker Verbindungsmittel.

5.4 Schnittgrössen von Praxisbeispielen

Die Dimensionen der Verbindungen im Versuchsprogramm orientieren sich anhand von Fallbeispielen analysierten Schnittgrössen. Die analysierten Schnittgrössen von Praxisbeispielen aus Nadelholzkonstruktionen sind in Abb. 8 getrennt nach Zug- und Druckkraft zusammengefasst.

- Fachwerkbinder, Spannweite 35.5 m, GL28h
- Fachwerkbinder, Spannweite 32.0 m
- Fachwerkbinder, Spannweite 34.0 m, GL24

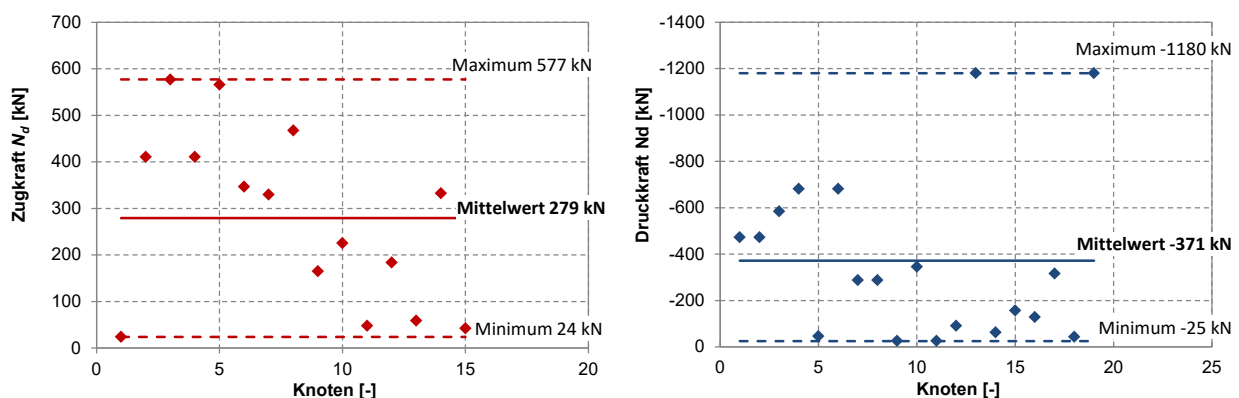


Abb. 8: Schnittgrössen in Abhängigkeit der Knotenanzahl in den Fachwerkbindern

FAZIT aus Praxisbeispielen in Nadelholz		Anmerkungen
Anschlusskräfte (Design-Werte)	$F_d = 280-380$ kN im Mittel $F_{d,max} = 1180$ kN	
Beanspruchung	II zur Faser $\alpha = 0^\circ$ ⊥ zur Faser $\alpha = 90^\circ$	
VM Layout Fichte	3-4 Schlitzbleche mit StD Ø 6.2 mm $m = 6 - 20$ Reihen, $n = 3$ bis max. 6 Spalten (hintereinander)	m = Anzahl VM senkrecht zur Kraft- richtung n = Anzahl hintereinanderliegender VM in Krafrichtung
Querschnitte für Buche	eher schlank, z. B. 75/300 mm, 100/200 mm	

5.5 Grundlagen zu Anschlüssen mit mechanischen Verbindungsmitteln auf Abscheren (Stabdübel, Bolzen, Passbolzen, Schrauben, Gewindestangen)

5.5.1 Lochleibungsfestigkeit

Lochleibungsfestigkeitsparameter für Laubholz sind aus Literatur bekannt und in Bemessungsansätzen aktueller Normen berücksichtigt, vgl. Abb. 9 und Abb. 10. Die Bemessung bzw. die Tragfähigkeit ist unabhängig von der Festigkeitsklasse und nur von der Rohdichte abhängig. Daher spielt für die Validierung der Konzepte durch Versuche nur die Rohdichte eine Rolle. Die in den Bemessungsansätzen aktuell verwendete Rohdichte von 530 kg/m³ der Laubholzklasse D30 in der SIA 265:2012 ist für eine effiziente Ausnutzung der Trageigenschaften für BSH in Laubholz zu gering. Für die zu erarbeitenden Bemessungskonzepte für Verbindungen in LH wird auf die in Teilprojekt 1 erarbeitenden Rohdichten und die in den Versuchen verwendeten zurückgegriffen.

- Untersuchungen erfolgen an GL42h als niedrigste Festigkeitsklasse aus dem TP1
- Rohdichte ist bei jedem Prüfkörper zu bestimmen

Die Lochleibungsfestigkeiten unter einem Winkel zur Faser weichen zwischen der Bestimmung mittels linearer Interpolation und Bestimmung mit „Hankinson“ Verlauf weniger als 1 % voneinander ab, vgl. Abb. 11.

- Zwischenwinkel wurden nicht betrachtet werden

Bekannte Lochleibungsfestigkeiten für Stabdübel für Laubholz zeigen Streuungen von mehr als 50 %. Die Werte nach SIA 265:2012 und SN EN 1995-1-1:2004 sind gleich und liegen im unteren bis mittleren Streubereich. Varianzen in der Lochleibungsfestigkeit wirken sich ca. zur Hälfte in der Tragfähigkeit aus.

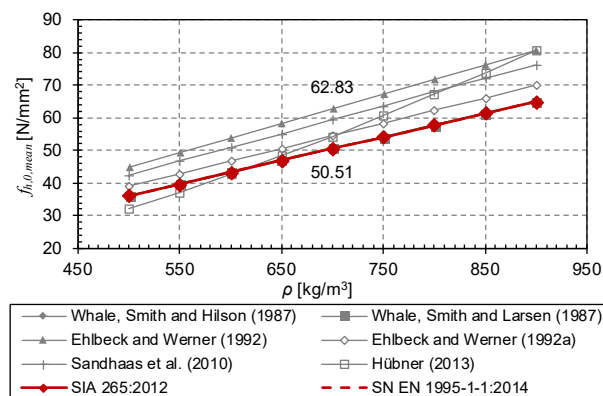


Abb. 9: Mittlere Lochleibungsfestigkeit in Abhängigkeit der Rohdichte

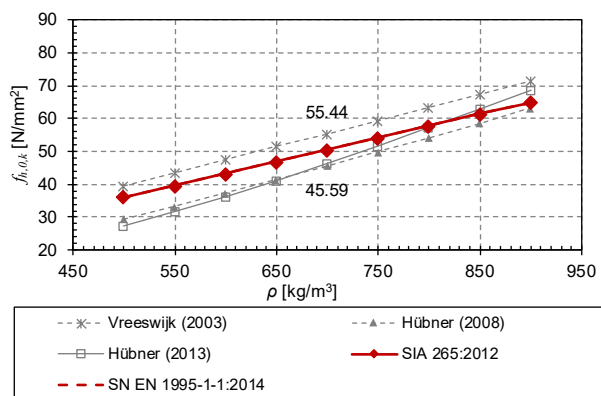


Abb. 10: Charakteristische Lochleibungsfestigkeit in Abhängigkeit der Rohdichte

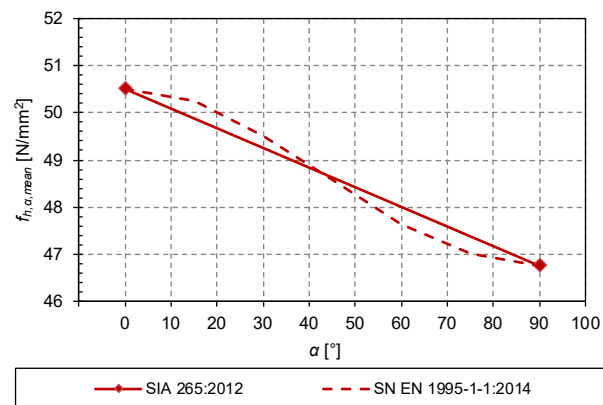


Abb. 11: Lochleibungsfestigkeit unter einem Winkel zur Faser in Folge Hankinson oder linearer Interpolation

5.5.2 Tragfähigkeit der Verbindungen auf Abscheren

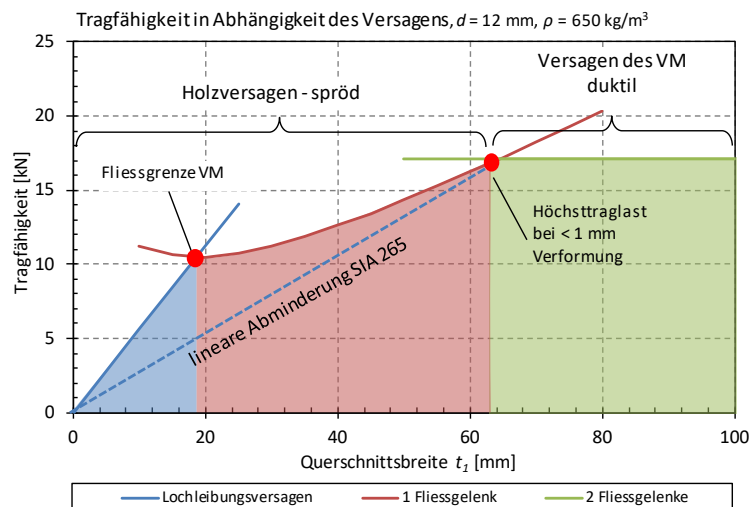
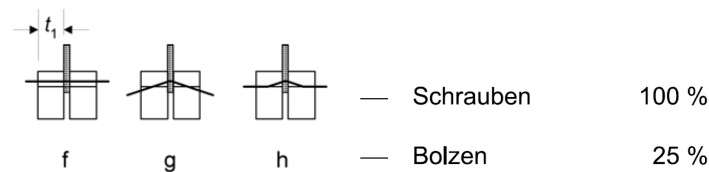
Für die Bemessung der Tragfähigkeit sind im Folgenden die relevanten Bemessungsformeln aus der SIA 265:2012 und SN EN 1995-1-1:2004 auszugsweise dargestellt und im Diagramm in Abhängigkeit von der Seitenholzdicke miteinander verglichen.

SIA 265:2012
$$R_{d,Verb} = R_{d,Absch} + \Delta R_{d,Seilw} = k_{\alpha} k_{red} n_{tot} k_{\beta} \sqrt{M_{u,k} f_{h,k} d_{ef}} + \Delta R_{d,Seilw} \quad (2)$$

$$\Delta R_{d,Seilw} = \min \left[\begin{array}{l} 0.25 R_{ax,d} \\ 1.0 R_{d,Absch} \end{array} \right] \text{ nur bei Schrauben} \quad (3)$$

SN EN 1995-1-1:2004

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,1,k} t_1 d \quad (f) \\ f_{h,1,k} t_1 d \left[\sqrt{2 + \frac{4 M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^2}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (g) \\ 2.3 \sqrt{M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (h) \end{array} \right. \quad (4)$$



Definition und Diskussion der Verbindungsmittel nach SIA 265:2012 und SN EN 1995-1-1:2004

Verbindungsmittel	SIA 265	SN EN 1995-1-1
Bolzen	<ul style="list-style-type: none"> - Lochspiel bis 1 mm ➔ Zu grosse Verformungen ➔ Nicht relevant 	
Stabdübel	<ul style="list-style-type: none"> - Bemessung nach Johansen (2 FG) - Lineare Abminderung bei reduzierten Abständen - Steifigkeiten für 0° und 90° geg. - Grössere VM Abstände parallel - Festigkeitsklassen S235, S355 	<ul style="list-style-type: none"> - Bemessung nach Johansen - Tragfähigkeit ca. 5 % höher - Steifigkeiten für 0° geg., ca. 70% steifer - Geringere VM Abstände parallel - Festigkeitsklassen S235, S355

Passbolzen	<ul style="list-style-type: none"> - Bemessung wie Stabdübel - keine Seilwirkung - Festigkeitsklassen S235, S355 	<ul style="list-style-type: none"> - Bemessung wie Stabdübel - Seilwirkung bis 25 %
Schrauben $d > 6 \text{ mm}$	<ul style="list-style-type: none"> - Bemessung wie Stabdübel unter Verwendung effektiver Durchmesser - Nur vorgebohrt möglich - Seilwirkung bis 100 % - höhere Stahlzugfestigkeiten 	
Schrauben $d \leq 6 \text{ mm}$	<ul style="list-style-type: none"> - Bemessung wie Stabdübel unter Verwendung effektiver Durchmesser - Unterscheidung zw. Vorbohren/Nicht vorbohren 	

Nach SN EN 1995-1-1 können Passbolzenverbindungen bis zu 25 % höhere Traglast durch Seileffekt erreichen. Passbolzen werden in der Praxis angewendet.

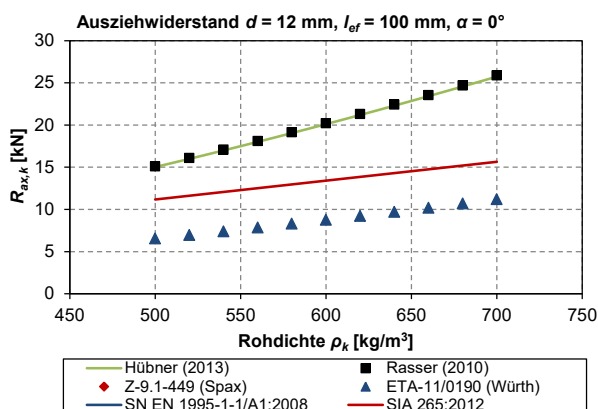
- ➔ Im Versuchsprogramm mit betrachten
- ➔ Reduziertes Versuchsprogramm im Vergleich mit Stabdübeln

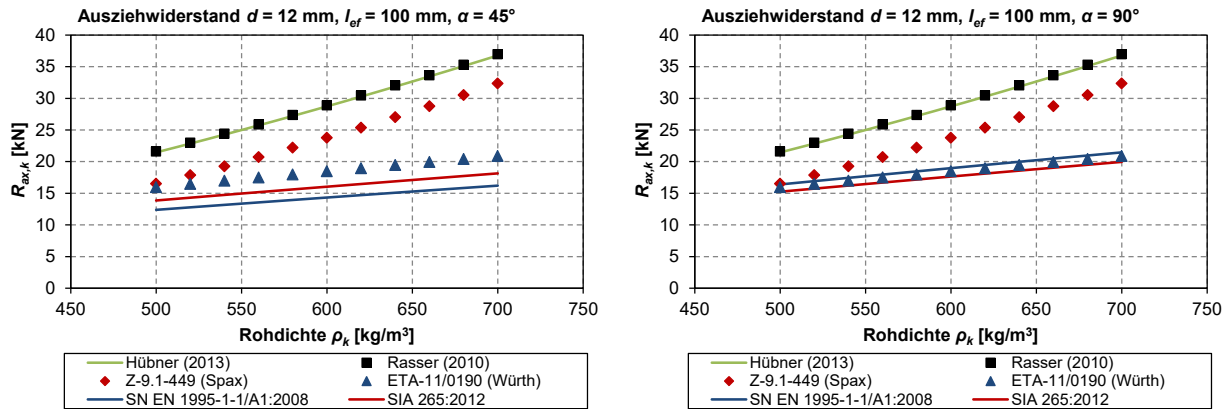
Für Schrauben ohne vorbohren liegen keine Ergebnisse zu Lochleibungsfestigkeiten in Laubholz vor. Dennoch wird von Gemeinsamkeiten ausgegangen und ein Versuchsprogramm in Anlehnung an die Stabdübelverbindungen vorgeschlagen.

5.6 Grundlagen zu Anschlüssen mit Schrauben auf Herausziehen

Für den Auszieh Widerstand von Holzschrauben wurde von Hübner (2013) ein Bemessungsmodell basierend auf den Versuchswerten in Eschen-, Buchen und Robinien-BSH erstellt. Ferner wurde von Rasser (2010) für Eschen-BSH ein Bemessungsmodell erarbeitet. In den Normen sind für Laubholz keine gültigen Modelle vorhanden.

- Hübner (2013): Vorbohren, $4 \text{ mm} \leq d \leq 20 \text{ mm}$; $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$; $4d \leq l_{ef} \leq 7d$
- Rasser (2010): Eschen BSH, $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$
- ETA-11/0190 (Würth): Vorbohren in LH, $4 \text{ mm} \leq d \leq 14 \text{ mm}$, $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$, $\rho_k \leq 590 \text{ kg/m}^3$
- Z-9.1-449 (Spax): Vorbohren in LH, $8 \text{ mm} \leq d \leq 12 \text{ mm}$, $15^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$, $\rho_k \leq 590 \text{ kg/m}^3$
- SIA 265:2012: vorbohren, keine Einschränkung auf die Holzart; $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$
- SN EN 1995-1-1:2004+A1+A2: vorbohren, Einschränkung auf Nadelholz; $30^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$





- ➔ Für Schrauben ohne vorbohren sind keine Werte für Herausziehen vorhanden, Einfluss Durchmesser, Einschraubwinkel, Einbindelänge
- ➔ Für Kopfdurchziehen für Buche und Eiche sind normativ keine Angaben vorhanden; einzelne Regelungen sind z. B. in ETA-11/0190 mit max. Rohdichten von 590 kg/m^3
- ➔ Für $l_{ef} \geq 10 d$ wird Stahlzugversagen massgebend

FAZIT Herausziehen von Schrauben		Anmerkungen
Parameter	- Tragfähigkeit - Steifigkeit	
Hauptpunkte	- Ganze Verbindungen - Variation des Durchmessers - Variation des Einschraubwinkels - Variation der Einbindelänge	- kein Rückschluss auf R_{tr} , wegen kombinierter Beanspruchung - kein allgemeingültiges normrelevantes Ergebnis
Nebenpunkte	- Mindestrand- und Verbindungsmittelabstände - Kopfdurchziehen - Holzfeuchte	

5.7 Grundlagen zu eingeklebten Gewindestangen

Die eingeklebten Gewindestangen sind als System, bestehend aus Gewindestange, Klebstoff, Know-How zur Herstellung und Qualitätssicherung, zu betrachten. Für eine optimale Qualitätssicherung spielt die Verklebung eine wichtige Rolle. Wobei derzeit noch offene Punkte für die qualitätssichere Verklebung von Keilzinken und Flächenverklebung in Buche vorhanden sind. Normativ sind keine Angaben für die Ausführung in Laubholz vorhanden.

- Bemessungsgrundlagen können durch Projekt zur Verfügung gestellt werden. Aber: Wem unterliegt die Bemessung; der ausführenden Firma?
- SIA 265:2012: keine Angaben
- SN EN 1995-1-1:2004: keine Angaben
- DIN EN 1995-1-1/NA:2010-12: Angaben zur Bemessung von Verbindungen mit eingeklebten Stahlstäben; $\alpha = 0^\circ$ und 90°

Die Verklebung wird als ein hohes Risiko angesehen:

- ➔ allgemeingültigen Bemessung anstreben?

Folgende Randbedingungen wären dabei zwingend vorgegeben:

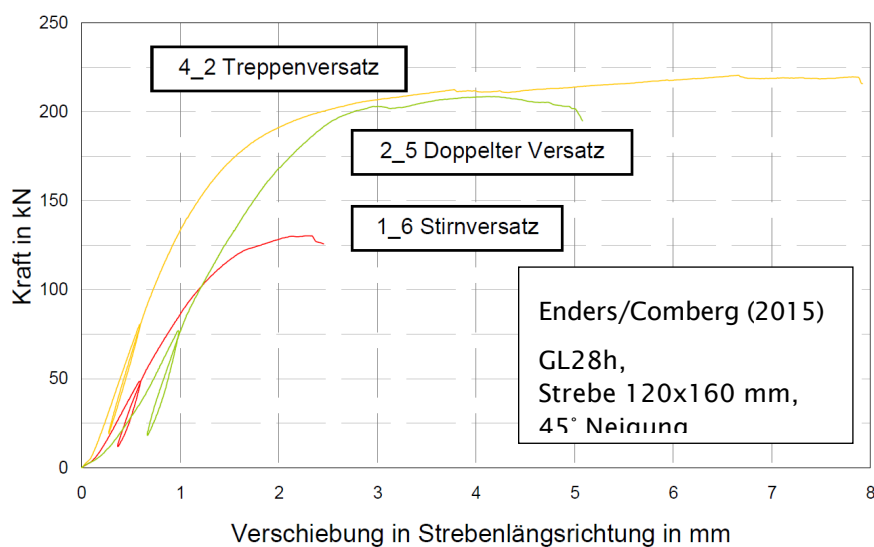
- Klebstoff ist für Laubholz geeignet
- Konzept für Anwendung in Praxis zur Herstellung und Erfüllung der Qualitätssicherung ist vorhanden (Guideline mit Vorgaben und Randbedingungen)

FAZIT für eingeklebte Gewindestangen		Anmerkungen
Parameter	- Tragfähigkeit - Steifigkeit	- Qualitätssicherung
Hauptpunkte	- Durchmesser - Einbindelänge - Vermeidung Blockscherversagen	- Systemlösungen
Nebenpunkte	- Mindestrand- und Verbindungsmittelabstände - Holzfeuchte - Versagen des Stahles - Versagen der Klebefuge	-

5.8 Grundlagen zu Versätzen

Der einfache Versatz (Stirn- und Fersenversatz) zeigt wesentlich geringere Traglasten im Vergleich zum doppelten Versatz und Treppenversatz mit geringerer Einbindetiefe. In Laubholz werden Traglasten bis 400 kN erwartet. Einbindetiefen von 60 mm erscheinen zu gross.

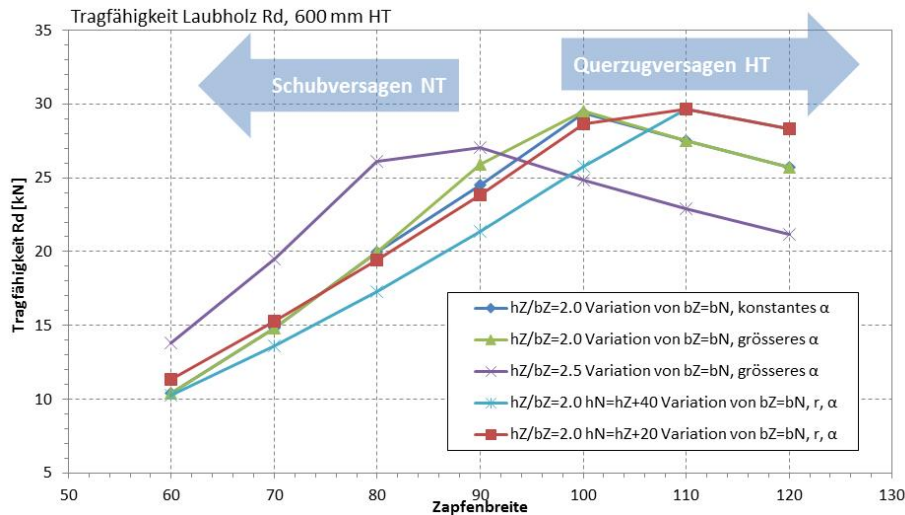
- $R_{\text{Doppelter Versatz}} \approx 2 R_{\text{Stirnversatz}}$
- $R_{\text{Treppenversatz}} \text{ mit } 1/3 t_v \approx R_{\text{Doppelter Versatz}}$



FAZIT für Versätze		Anmerkungen
Parameter	- Tragfähigkeit - Steifigkeit	- abhängig von Festigkeitsklasse
Hauptpunkte	- Doppelter Versatz und Treppenversatz - Kraftfaserwinkel $\alpha = 30$ bis 60° - Optimierung der Einbindetiefe - Höhe der Strebe 100 mm und 160 mm	- Für Strebenhöhe 160 mm sind Vergleichswerte vorhanden aus Literatur
Nebenpunkte	- Vorholzlänge - Holzfeuchte	

5.9 Grundlagen zu Schwalbenschwanzverbindung

Der Schwalbenschwanzverbinder wird primär als Montagehilfe eingesetzt und zeigt relativ geringe Traglastkapazitäten (ca. 30 - 50 kN). Weiterhin haben Passungenauigkeiten und Feuchteinfluss einen grossen Einfluss. In Abhängigkeit der Hauptträgerhöhe wird ein Schubversagen im Nebenträger oder Querzugversagen im Hauptträger massgebend.



FAZIT für Schwalbenschwanzverbindung		Anmerkungen
Hauptpunkte	<ul style="list-style-type: none"> - Zu geringe Traglasten - Keine Versuche vorgesehen 	Systemverbinder bevorzugt für Haupt-/Nebenträgeranschluss

5.10 Grundlagen zu Systemverbindern

Generell wären die Grundlagen zu diesen Anschlüssen über die Ergebnisse aus den Schraubenversuchen vorhanden. Die Tragwirkung der Gesamtverbindung ist jedoch durch den Verbinder selbst beeinflusst. Daher sollte die theoretischen Berechnungen durch Versuche validiert werden. In Anlehnung an die Ergebnisse werden Versuche mit den Praxispartnern abgestimmt und durchgeführt. Der Schwerpunkt liegt auf Haupt-/Nebenträgeranschlüssen.

➔ Praxispartner: Sherpa, Würth, SFS

FAZIT für Systemverbinder		Anmerkungen
Hauptpunkte	<ul style="list-style-type: none"> - Systemverbinder bevorzugt für Haupt-/Nebenträgeranschluss - Traglastbereiche/Verbindergrössen - Zeitl. aufbauend auf den Versuchsergebnissen zu Anschlüssen mit Schrauben 	

6 Literatur

- Augustin, M. (2009) Abtragung hoher Lasten mit Sherpa-Systemverbindern, 15. IHF, Kompetenzzentrum holz.bau Forschung GmbH, Graz
- Augustin, M. (2011) Prüftechnik und Modellbildung für HT/NT-Systemverbinder, 17. IHF, Kompetenzzentrum holz.bau Forschung GmbH, Graz
- Bahmer, R. (2010) Geklebte Stahl/Holz/Verbindungen – starre Verbindung mit geringer Querschnittsschwächung, 16. IHF, Haibach
- Bathon, L., et al. (2009) Holz-Stahl-Klebeverbindungen mit Flachkörpern – Entwicklungen und Anwendungen, 15. IHF, Wiesbaden
- Blass, H.J. (2012) Verbindungssysteme für Holzkonstruktionen, Vorlesungsunterlagen für Holzbau und Baukonstruktion, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe
- Blass, H.J., Flaig, M. (2015) Keilgezinkte Rahmenecken und Satteldachträger aus Brettspertholz, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, ISBN 978-3-7315-0381-1
- Blass, H.J., Ehlbeck, J., Kurzweil, L. (1997) Berücksichtigung der Momentenübertragung von Nagelplattenverbindungen bei der Bemessung, Universität Fridericiana Karlsruhe
- Blass, H.J., Görlacher, R., Steck, G. (1995) Holzbauwerke, Bauteile, Konstruktionen, Details nach Eurocode 5, STEP 2, Schweizerische Arbeitsgemeinschaft für das Holz, Zürich
- Bogusch, W. (2011) Der grosse Bruder: Saldome 2
- BTI Befestigungstechnik GmbH & Co. KG, Holzverbindungstechnik: Präzise, schnell und sicher, Ingelfingen, www.bti.de (29.10.2015)
- Cimadevila, J., Rodriguez, V., Chans, M.D. (2006) Experimental behaviour of threaded steel rods glued into high-density hardwood, in Elsevier, University of A Coruna
- Derix (2015) <http://www.derix.de/de/referenzen/sport-freizeit> (30.11.15)
- Enders Comberg, M. (2015) Leistungsfähige Verbindungen des Ingenieurholzbaus, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, ISBN 9783731503514
- Ernst, H. (2010) Montagefreundliche Verbindung für biegesteife Rahmenecken mit Würth-Vollgewindeschrauben, 16. IHF, Rülzheim
- Eurotec, Pedix Stützenfuss (<http://www.holzhandel-stefan.de/shop/EUROTEC-Pfostentraeger-PediX-140-50-mm>) (30.11.15)
- Gehri, E. (2009) Eingeklebte Anker – Anforderungen und Umsetzungen, 15. IHF, Rüşchlikon
- Gehri, E. (2010) Schraubenverbindungen für Laubholzkonstruktionen, 16. IHF, Rüşchlikon
- Haas Fertigbau GmbH (2015) <http://haas-gewerbebau.de/hp720/Vordach-Verlade-und-Kommissionsueberdachung.htm> (30.11.15)
- Holzbau Kompetenzzentren, Zimmermannsmässige Verbindungen, http://www.holzbau-kompetenzzentren.de/uploads/media/TP_II-Holz-Holz-Verbindungen.pdf, (29.10.2015)
- Hübner, U. (2009) Laubhölzer für lastabtragende Bauteile im Bauwesen, in OIB aktuell, Kompetenzzentrum holz.bau Forschung GmbH, Graz
- Jensen, J., Sasaki, T., Koizumi, A. (2002) Plywood frame corner joints with glued-in hardwood dowels, Herausgeber: The Japan Wood Research Society, J Wood Sci (2002) 48:289-294
- Knapp Verbinder (2015) Verbindungssysteme für den modernen Holzbau (http://www.knapp-verbinder.com/index.php?option=com_phocadownload&view=category&id=43%3Aholzbauelemente&Itemid=86&lang=de) (11.11.15)
- Larsen, H.J., Munch-Andersen, J. (2011) Timber Structures – A review of meetings 1-43, Part 4: Connections, in Danish Timber Information
- Lignum (2010), Holzbau Hallen, Herausgeber: Lignum, Lignum Broschüre no. 10
- Marchand, G. (1998) Berechnung und konstruktive Möglichkeiten bei Querkzugspannungen in Brett-schichtholzträgern, in Schweizer Ingenieur und Architekt, Lausanne
- Mönck, W., Rug, W. (2015) Holzbau: Bemessung und Konstruktion, Beuth Verlag, ISBN 978-3-410-21908-8

- Neue Holzbau, GSA Technologie, http://www.neueholzbau.ch/wpcontent/uploads/2011/02/WEBSITE_Text_GSA.pdf (29.10.2015)
- Neuhaus, H. (2009) Grundlagen, Bemessung, Nachweise Beispiele, Vieweg+Teubner Verlag, ISBN 978-3-8348-1286-5
- Oberer, F. (2012) Die neue Holzbau AG - Effizient bauen mit Laubholz, erschienen in Wald und Holz
- Ortner, J. (2014) Instandsetzungshandbuch für historische Dachwerke und deren Verbindungen, Masterarbeit, TU Graz
- Pcae GmbH, Hannover (http://www.pcae.de/main/progs/details/holz2008/holz73/holz_stoesse_allgemeines.htm) (11.11.15))
- Rug, W., Mönck, W. (2007) Holzbau, Bemessung und Konstruktion, ISBN 978-3-345-00815-3
- SFS intec, Schrauben Befestigungstechnik, http://sfs.biz/sfs_download/media/de/general_media/downloadcenter/sfs_unimarket_1/befestigungstechnik/konstruktiver_holzbau/d_wt_prospekt_6_5__8_2_ubt.pdf (05.11.2015)
- Sherpa HOLZBAUVERBINDUNGEN effizient, flexibel, sicher - komplette Tragwerksysteme für den Holzbau leicht bemessen (<http://www.tragwerkloesungen.ch/Downloads/Statikhandbuch.pdf>) (30.11.15))
- SIHGA Handels GmbH, WabaFix (<http://www.sihga.com/holzbau-wasserbau/products/systemverbinder-stuetzenfuesse/zafixR-stz.html>) (11.11.15))
- Simpson Strong-Tie (<http://www.strongtie.de/products/detail/balkenschuhe-2-teilig/489>) (11.11.15))
- Strahm, T. (2012) Esche und Buche im Ingenieurholzbau, 2. Forum Holzbau Beaune 12, Lungern
- TiComTec GmbH (2010) Eingeklebte Stahlstabe, Technisches Dossier, Haibach, www.ticomtec.de
- Tschümperlin, F. (2013) Tragwerke der besonderen Art –hoch hinaus mit Holz-Holz-Verbindungen, Holzbautag Biel, Eschenbach
- Wiegand, T. (2003) Entwicklung eines Rechenverfahrens für keilgezinkte Rahmenecken und Biegeträger ohne oder mit Zwischenstück aus Brettschichtholz oder Holzwerkstoffplatten, Dissertation, Universität Wuppertal
- Winter, W., et al. (2005) Holzverbindungen, Vorlesungsunterlagen, TU Wien, Institut für Tragwerkslehre und Ingenieurholzbau
- Würth GmbH & Co. KG Konstruktiver Holzbau - Bemessungstabellen für die Holzschrauben ASSY® plus VG ASSY® 3.0 ASSY® 3.0 SK gemäss DIN 1052:2008-12
- DIN EN 1995-1-1/NA:2010-12 Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter – Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin.
- Enders-Comberg, M. (2015) Leistungsfähige Verbindungen des Ingenieurholzbaus, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, ISBN9783731503514.
- ETA-11/0190 (2013) Europäische Technische Zulassung, Selbstbohrende Schrauben als Holzverbindungsmitel, Würth GmbH & Co. KG, Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin.
- Franke, S., Franke, B., Naderer, E. (2016) Anschlüsse in Buchenholz - Kommentierte Auslegeordnung zu Modul 1 Katalog von Anschlüssen in Laubholzkonstruktionen, Forschungsbericht, Berner Fachhochschule, Biel.
- Franke, S., Franke, B., Naderer, E. (2016) Anschlüsse in Buchenholz - Erarbeitung Details und wissenschaftliche Anforderungen zu relevanten Anschlüssen, Forschungsbericht, Berner Fachhochschule, Biel.
- Gehri, E. (2010) Schraubenverbindungen für Laubholzkonstruktionen, 16. IHF, Rüschlikon.
- Hübner, U. (2009) Laubhölzer für lastabtragende Bauteile im Bauwesen, in OIB aktuell, Kompetenzzentrum holz.bau Forschung GmbH, Graz.
- Hübner, U. (2013) Mechanische Kenngrößen von Buchen-, Eschen- und Robinienholz für lastabtragende Bauteile, Dissertation, Technischen Universität Graz, Graz, ISBN: 978-3-85125-314-6.
- Rasser (2010) Erforschung der Ausziehkenngößen für Holzschrauben in Eschen-BSH, Bautechnische Versuchs- und Forschungsanstalt Salzburg, Forschungsnews, Ausgabe 06/2010, Salzburg.
- SIA 265:2012 Holzbau, Schweizer Ingenieur und Architektenverein, Zürich.

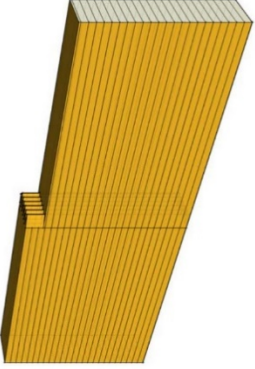
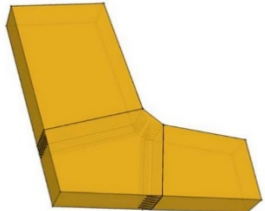

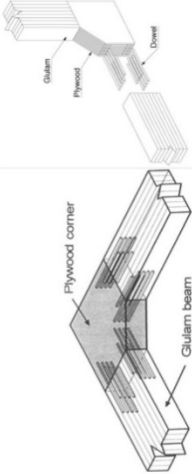
SN EN 1995-1-1:2004/A1:2008/A2:2014 Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau, Schweizer Ingenieur und Architektenverein, Zürich.

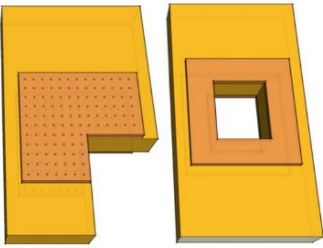
Strahm (2014) Laubholzkonstruktionen – Realisierte Bauwerke in der Schweiz, 20. IHF, Garmisch Partenkirchen, Deutschland.

Z-9.1-449 (2012) Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung, SPAX Schrauben als Holzverbindungsmitel, SPAX International GmbH & Co. KG, Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin.

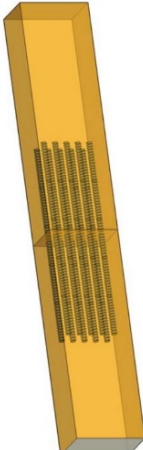

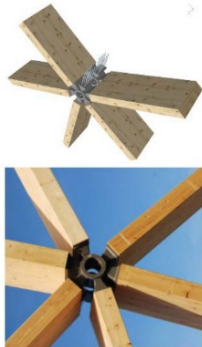
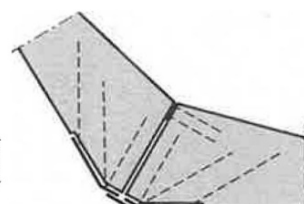

A Katalog der einzelnen Verbindungen je Verbindungsart/ Verbindungsmittel

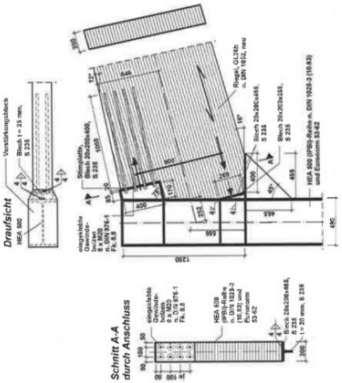

A.1 Geklebte Verbindungen

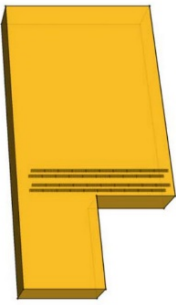

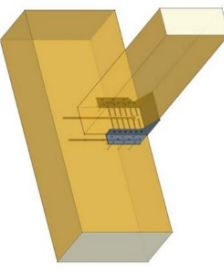
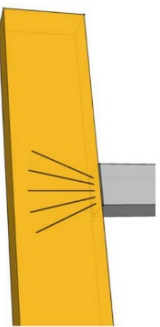
Zug/Druck (, ⊥ zur Faser)	Systemskizze	Praxisbeispiel	Bewertung für Laubholz					Anmerkungen
			NEIN 0	1	2	JA 3		
	<input type="checkbox"/> Universalkleimzinkenverbindung 		<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		Steiger: In TPI sind Keilzinkenverbindungen für Lamellenstosse (30 mm) enthalten. Diese decken die Verbindung nicht ab. Die Universalkleimzinkenverbindung wird von allen Anwesenden als wenig relevant für das Projekt angesehen und mit 1 bewertet.
Moment	<input type="checkbox"/> Rahmenecke, Generalkleimzinkenverbindung 	<input type="checkbox"/> Reitsporthalle Riesenbeck, Derix (2015) 	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		Gehri: Es existieren bereits Verbindungen mit Sperrholzbohle. Diese sind jedoch nicht leistungsfähig genug.
	<input type="checkbox"/> Rahmenecke, Sperrholz Rahmen mit Laubholz Dübel, Jensen (2002) 		<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		Die Generalkleimzinkenverbindung wird von allen Anwesenden als wenig relevant für das Projekt eingestuft und mit 1 bewertet.

Querkraft- schluss				NEIN 0	<input checked="" type="checkbox"/>	1	<input type="checkbox"/>	2	<input type="checkbox"/>	JA 3	<input type="checkbox"/>	
Querzug, Verstärkung	<input type="checkbox"/> Aufgeklebte Holzwerkstoffplatten 			NEIN 0	<input checked="" type="checkbox"/>	1	<input type="checkbox"/>	2	<input type="checkbox"/>	JA 3	<input type="checkbox"/>	Steiger: In Hochleistungsträgern sollten keine Durchbrüche gemacht werden. Zudem sind aufgeklebte Platten nicht ästhetisch ansprechend. Die Verstärkung durch aufgeleimte Holzwerkstoffplatten wird im weiteren Verlauf des Projekts nicht weiter berücksichtigt.
Querdruck, Auflager, Verstärkung				NEIN 0	<input checked="" type="checkbox"/>	1	<input type="checkbox"/>	2	<input type="checkbox"/>	JA 3	<input type="checkbox"/>	

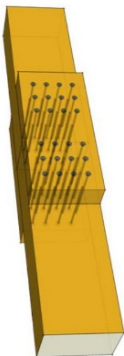
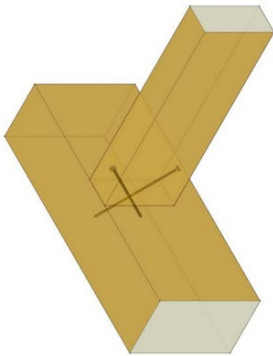
A.2 Eingeklebte Gewindestangen

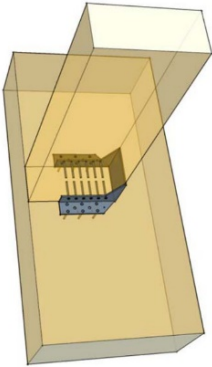


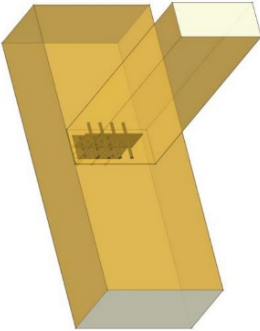
	Systemskizze	Praxisbeispiel	Bewertung für Laubholz					Anmerkungen
			NEIN 0	1	2	3	JA	
Zug/Druck (, \perp zur Faser)	<input type="checkbox"/> Zugstabverlängerung 	<input type="checkbox"/> Zuganschluss GSA-Verbindung Esche, Neue Holzbau (2015)  <input type="checkbox"/> Kraftschlüssiges Rohranschlussystem, Bogusch (2011) 	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	3	JA	Die Relevanz für das Projekt wird als hoch angesehen. Die GSA-Verbindungen können als Grundlage herangezogen werden. Hübner: Letztere ist elegant in vielerlei Hinsicht: Potential der Kraftübertragung, Ästhetik, Brandschutz, Transport, Montage etc.
Moment	<input type="checkbox"/> Rahmenecke mit schräg eingeleimten Stäben, Blass et al. (1995) 	<input type="checkbox"/> Rahmenecke GSA-Verbindung, Neue Holzbau (2015) 	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	3	JA	Die Relevanz für das Projekt wird als hoch angesehen. Die GSA-Verbindungen können als Grundlage herangezogen werden. Hübner: Auch mit Schrauben denkbar. Überprüfung für öffnende Momente.

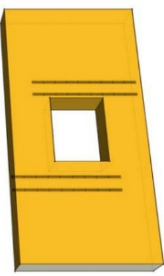
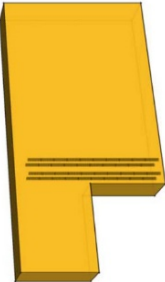
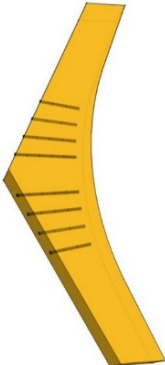
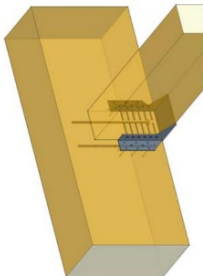
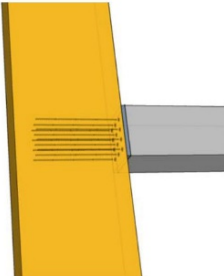
Moment	<input type="checkbox"/> Rahmenecke mit Anschluss an Stahlstütze, Rug (2007) 		<table border="1"> <tr> <td>NEIN</td> <td>1</td> <td>2</td> <td>JA</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td>3</td> </tr> <tr> <td></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td></td> </tr> </table>	NEIN	1	2	JA	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	3		<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		Klicken Sie hier, um Text einzugeben.
NEIN	1	2	JA													
0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	3													
	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>														
Querkraft- schluss		<input type="checkbox"/> Anschluss Träger an Stütze, GSA Verbindung, Oberer (2012) 	<table border="1"> <tr> <td>NEIN</td> <td>1</td> <td>2</td> <td>JA</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td>3</td> </tr> <tr> <td></td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td></td> </tr> </table>	NEIN	1	2	JA	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	3		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		Die Ausführung in Buche ist nicht relevant, da Buche keinen höheren E-Modul als Fichte hat und somit die Vorteile der Buche nicht ausgenutzt werden können. Die Durchbiegung beim Einsatz von Buche und Fichte sind dieselben.
NEIN	1	2	JA													
0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	3													
	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>														

<p>Querzug, Verstärkung</p>	<p><input type="checkbox"/> Querzugverstärkung bei Trägerdurchbruch</p>  <p><input type="checkbox"/> Querzugverstärkung bei Trägerschlingung</p>  <p><input type="checkbox"/> Querzugverstärkung bei gekrümmten Trägern</p>  <p><input type="checkbox"/> Querzugverstärkung bei unten angehängten Nebenträgern</p> 	<p>NEIN 0 <input type="checkbox"/></p> <p>1 <input type="checkbox"/></p> <p>2 <input type="checkbox"/></p> <p>JA 3 <input checked="" type="checkbox"/></p>	<p>Gehri: Die Querzugverstärkung sollte in 45° und nicht quer zur Faser angeordnet werden. Müller: Die Anordnung überprüfen und die Kennwerte für 0°/45°/90° bestimmen. Hübner: Satteldachbinder mit gekrümmten Untergurt und aufgelegt oder aufgeklebten First sind in Sachen Querzug und Querzugverstärkung nicht unheikel. Bei LH mit höherem Quellen und Schwinden verschärft sich das Problem und ist deshalb wichtig zu betrachten. Unten angehängte Nebenträger sind generell zu vermeiden. Wirtschaftlichkeit ist zu prüfen. Die Querzugverstärkungen durch eingeklebte Gewindestangen werden im weiteren Projektverlauf weiterbetrachtet und mit hoher Relevanz eingestuft.</p>
<p>Querdruk, Auflager, Verstärkung</p>	<p><input type="checkbox"/> Querdrukverstärkung</p> 	<p>NEIN 0 <input type="checkbox"/></p> <p>1 <input type="checkbox"/></p> <p>2 <input type="checkbox"/></p> <p>JA 3 <input checked="" type="checkbox"/></p>	<p>Gehri: Klassische Lösung zur Verringerung der Verformung. Die Querdehnung infolge Holzfeuchtewechsel ist zu beachten. Die Querdrukverstärkungen durch eingeklebte Gewindestangen werden im weiteren Projektverlauf weiterbetrachtet und mit hoher Relevanz eingestuft. Hübner: Auch Anwendung senkrechter Schrauben denkbar.</p>

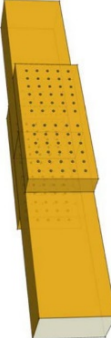
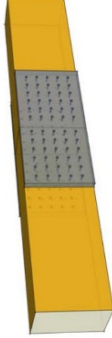
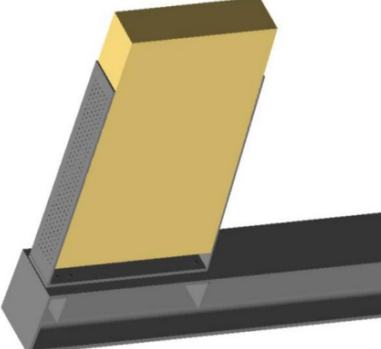
A.3 Selbstbohrende Schrauben und eingedrehte Gewindestangen

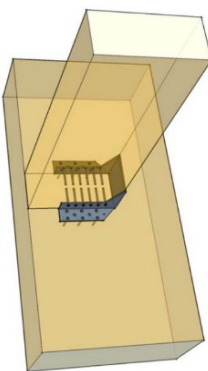
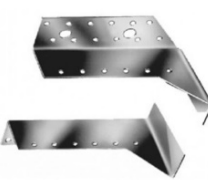
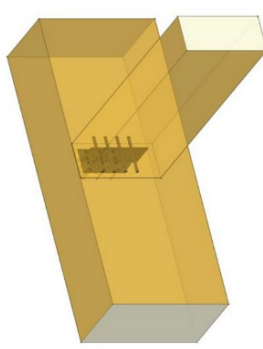

	Systemskizze	Praxisbeispiel	Bewertung für Laubholz					Anmerkungen
			NEIN 0	1	2	3	JA	
Zug/Druck (, < zur Faser)	<div> <input type="checkbox"/> Zugstabanschluss </div> 	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	JA 3	Gehri: Die Schrauben geneigt (45°) anordnen. Franke: Benötigt werden die Lochleibungs- und Auszugfestigkeit für kurze Schrauben ohne Vorbohren. Der Zugstabanschluss wird im Projekt weiter verfolgt. Hübner: eingeschlitzte Bleche oder beidseitige Stahlaschen mit schrägen Vollgewinde-Schrauben bevorzugen (mehrschnittig, Brandschutz, Ästhetik)
Moment	<div> <input type="checkbox"/> </div>	<input type="checkbox"/>	NEIN 0	1	2	3	JA	
Querkraftanschluss	<div> <input type="checkbox"/> Haupt-Nebenträgeranschluss mit schräg eingebrachten Schrauben </div> 	<input type="checkbox"/>	NEIN 0	1	2	3	JA	Werden im Tragwerk benötigt. Das Nebentragwerk hat jedoch nicht die erste Priorität und wird daher nicht gesondert betrachtet. Hübner: Für die Montage braucht es eine Unterstützung. Daher wären T-förmige Blechteile mit Nagel- bzw. Schraubverbindung am HT und StDü-Verbindung beim NT zu bevorzugen. Doch prinzipiell bei geringen Stückzahlen elegant.

Querkraft- anschluss	<input type="checkbox"/> Haupt-Nebenträgeranschluss mit angeschraubten Balken- schuh 	<input type="checkbox"/> Simpson (2015) 		<div> <div>NEIN</div> <div>0</div> <div><input checked="" type="checkbox"/></div> </div> <div> <div>1</div> <div><input type="checkbox"/></div> </div> <div> <div>2</div> <div><input type="checkbox"/></div> </div> <div> <div>JA</div> <div>3</div> <div><input type="checkbox"/></div> </div>	Die Bewertung erfolgt im Kapitel der System- verbinder
	<input type="checkbox"/> Haupt-Nebenträgeranschluss mit T-Verbinder 			<div> <div>NEIN</div> <div>0</div> <div><input type="checkbox"/></div> </div> <div> <div>1</div> <div><input type="checkbox"/></div> </div> <div> <div>2</div> <div><input checked="" type="checkbox"/></div> </div> <div> <div>JA</div> <div>3</div> <div><input type="checkbox"/></div> </div>	Die Bewertung erfolgt im Kapitel der System- verbinder

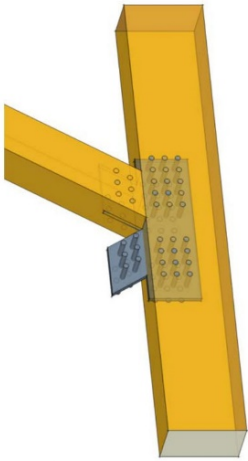

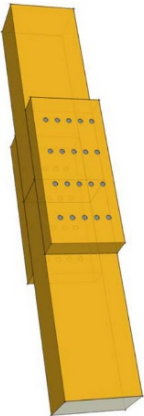
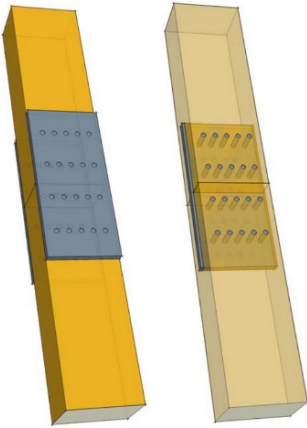
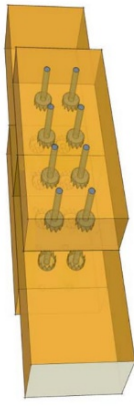
<p>Querzug, Verstärkung</p>	<p><input type="checkbox"/> Querzugverstärkung bei Trägerdurchbruch oder Ausklinkung</p>  <p><input type="checkbox"/> Querzugverstärkung bei gekrümmten Träger</p>  <p><input type="checkbox"/> Querzugverstärkung bei unten angehängten Nebenträger</p>  	<div> <input type="checkbox"/> </div>	<div> <div> <div>NEIN</div> <div>0</div> <div><input type="checkbox"/></div> </div> <div> <div>1</div> <div><input type="checkbox"/></div> </div> <div> <div>2</div> <div><input type="checkbox"/></div> </div> <div> <div>JA</div> <div>3</div> <div><input checked="" type="checkbox"/></div> </div> </div> <p>Durch die geringeren Querschnitte des Haupttragwerks ist das Nebentragwerk im Verhältnis gross und führt dazu, dass Querzugspannungen massgebend werden. Daher wird die Querzugverstärkung mit hoher Priorität bewertet. Die dargestellten Anordnungen der Verstärkungen sind zu überdenken.</p> <p>Als Kennwerte werden die Ausziehwiderstände benötigt.</p>
<p>Querdruk, Auflager, Verstärkung</p>	<p><input type="checkbox"/> Auflagenverstärkung Querdruk</p> 	<div> <input type="checkbox"/> </div>	<div> <div> <div>NEIN</div> <div>0</div> <div><input type="checkbox"/></div> </div> <div> <div>1</div> <div><input type="checkbox"/></div> </div> <div> <div>2</div> <div><input type="checkbox"/></div> </div> <div> <div>JA</div> <div>3</div> <div><input checked="" type="checkbox"/></div> </div> </div> <p>Als Kennwerte werden die Eindrückwiderstände benötigt.</p>

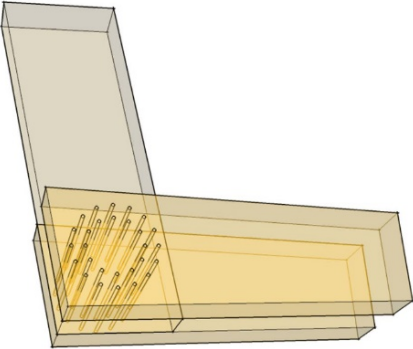
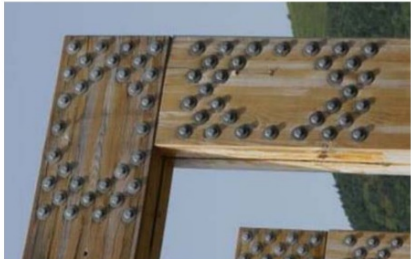
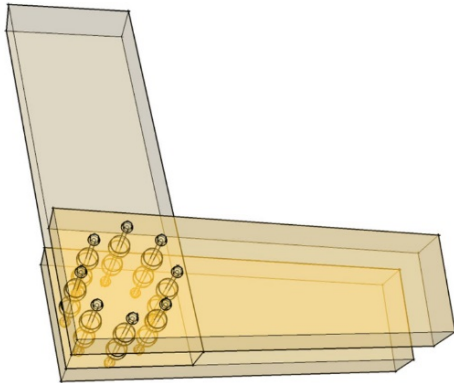

A.4 Nagel-/ Schraubenverbindung

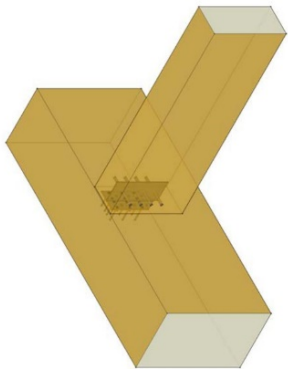

Systemskizze	Praxisbeispiel	Bewertung für Laubholz	Anmerkungen
<p><input type="checkbox"/> Zug/ Druck (, \perp zur Faser)</p> <p><input type="checkbox"/> Zugstoss ohne Blech</p>  <p><input type="checkbox"/> Zugstoss mit Blech</p> 		<p>NEIN 0 <input type="checkbox"/></p> <p>1 <input type="checkbox"/></p> <p>2 <input checked="" type="checkbox"/></p> <p>3 <input type="checkbox"/></p> <p>JA</p>	<p>Nägel werden in diesem Zusammenhang nicht betrachtet. Die kurzen Schrauben müssen ohne Vorbohren eingebracht werden, lange Schraube können mit Vorbohren eingebracht werden.</p> <p>Hübner: Schrauben sollten möglichst auf Zug und nicht auf Abscheren beansprucht werden. Nagelverbindungen sind bei LH generell in Frage gestellt, da ohne Vorbohren das Aufspalten sehr wahrscheinlich ist und mit Vorbohren der Aufwand groß ist.</p>
<p><input type="checkbox"/> Rahmenecke, Holzbinder an Stahlstütze, Ernst (2010)</p> 		<p>NEIN 0 <input checked="" type="checkbox"/></p> <p>1 <input type="checkbox"/></p> <p>2 <input type="checkbox"/></p> <p>3 <input type="checkbox"/></p> <p>JA</p>	<p>Die Rahmenecke wird im weiteren Projektverlauf nicht weiter betrachtet.</p> <p>Hübner: Rissbildung durch Zwängungen und n.ef beachten.</p>

Querkraft- schluss	<input type="checkbox"/> Haupt-Nebenträgeranschluss mit Balkenschuh		<input type="checkbox"/> Simpson (2015) 						Die Nägel werden als nicht relevant angesehen und nicht weiter betrachtet. Die kurzen Schrauben werden für die Verwendung von Systemverbindern benötigt. Der Balkenschuh wird jedoch als nicht relevant angesehen.					
				NEIN 0	<input checked="" type="checkbox"/>	1	<input type="checkbox"/>	2	<input type="checkbox"/>	3	<input type="checkbox"/>	JA	3	<input type="checkbox"/>
Querkraft- Verstärkung	<input type="checkbox"/> Haupt-Nebenträgeranschluss (eingehängt)		<input type="checkbox"/> Simpson (2015) 						Die Nägel werden als nicht relevant angesehen und nicht weiter betrachtet. Die kurzen Schrauben werden für die Verwendung von Systemverbindern benötigt.					
				NEIN 0	<input type="checkbox"/>	1	<input type="checkbox"/>	2	<input checked="" type="checkbox"/>	3	<input type="checkbox"/>	JA	3	<input type="checkbox"/>
Querkraft, Auflager, Verstärkung	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	NEIN 0	<input checked="" type="checkbox"/>	1	<input type="checkbox"/>	2	<input type="checkbox"/>	3	<input type="checkbox"/>	JA	3	<input type="checkbox"/>
	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	NEIN 0	<input checked="" type="checkbox"/>	1	<input type="checkbox"/>	2	<input type="checkbox"/>	3	<input type="checkbox"/>	JA	3	<input type="checkbox"/>

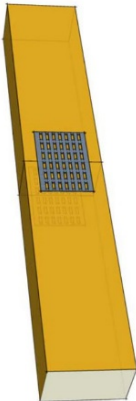

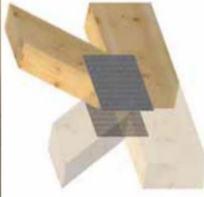
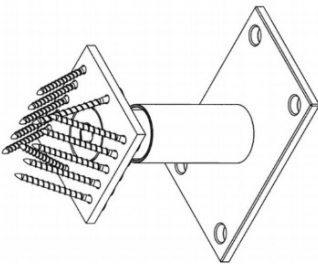

A.5 Stabdübel/ Passbolzen/ Dübel besonderer Bauart


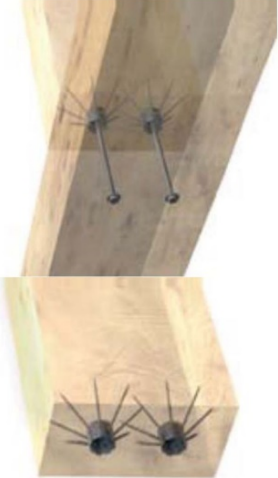
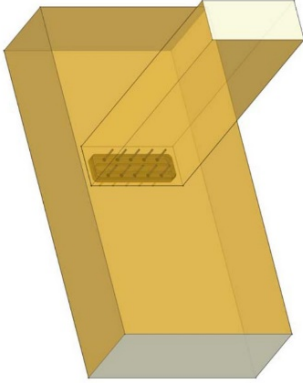
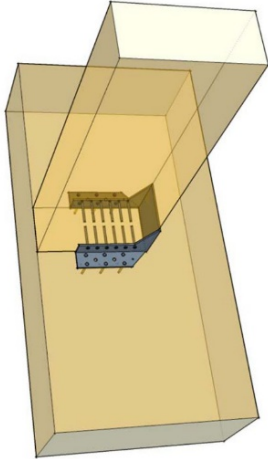



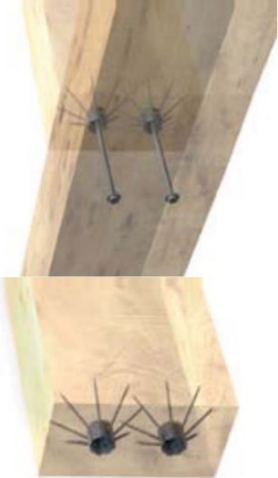
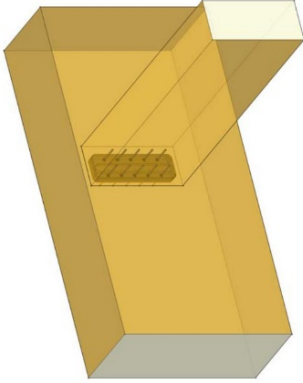
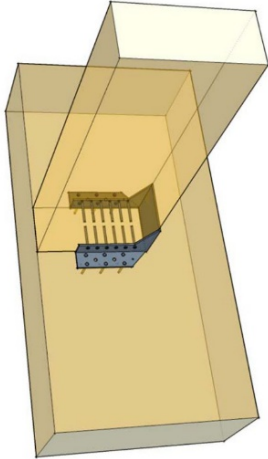



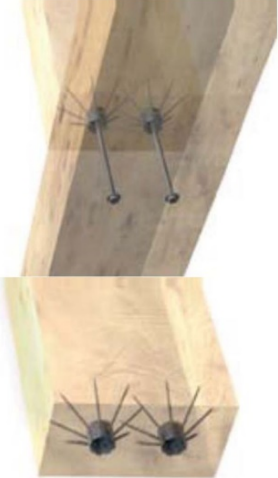
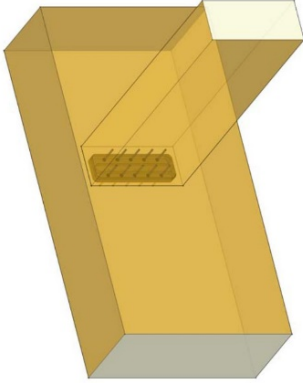
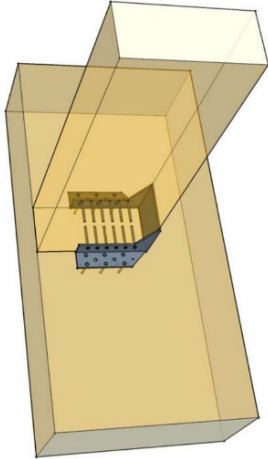


Zug/Druck (, < zur Faser)	Systemskizze	Praxisbeispiel	Bewertung für Laubholz					Anmerkungen
			NEIN 0	1	2	3	JA	
<input type="checkbox"/> Fachwerkstoss		<input type="checkbox"/> Fachwerkstoss, Hollinski (2005) 	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	JA 3	Die Stösse mit Stabdübeln und Bolzen in Verbindung mit Stahlflaschen haben eine hohe Duktilität und Leistung und werden daher mit hoher Priorität (3) betrachtet. Gehri: Das Wissen von Gruppen ist relativ gering. Untersuchungen von Gruppen sind wichtig. Die Betrachtung des Spaltverhaltens ist zu untersuchen, da Buche spröde ist.
	<input type="checkbox"/> Zugstoss mit Holzlaschen		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	JA 3	Zugstösse ohne Stahlflaschen werden nicht weiter betrachtet.
	<input type="checkbox"/> Zugstoss mit Stahlblech, aussenliegend oder innenliegend		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	JA 3	Die Stösse in Verbindung mit Stahlflaschen haben eine hohe Duktilität und Leistung und werden daher mit hoher Priorität (3) betrachtet. Hübner: außenliegende Bleche nur für Verbindungen mit schrägen Vollgewindeschrauben. Randabstände sind wichtig!
	<input type="checkbox"/> Zugstoss mit Dübeln besonderer Bauart		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	JA 3	Zugstösse ohne Stahlflaschen werden nicht weiter betrachtet. Verbindungen mit Dübeln besonderer Bauart werden als nicht relevant eingestuft. Hübner: Einpressen der Dübel ist fraglich, schlechte Ästhetik




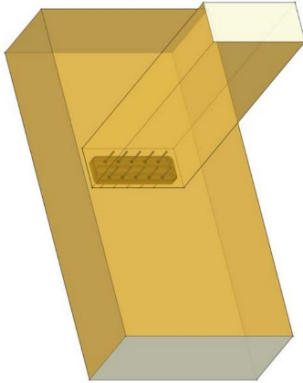

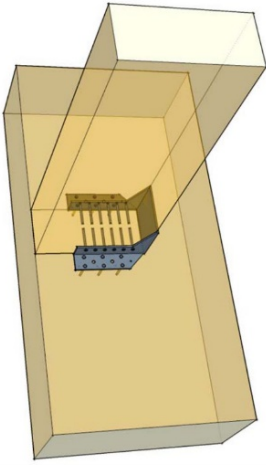
Moment	<input type="checkbox"/> Rahmenecke, Dübelkreis mit Stabdübeln/Bolzen 	<input type="checkbox"/> Franke (2013) 	<div> <div>NEIN</div> <div>0</div> <div><input type="checkbox"/></div> </div> <div> <div>1</div> <div><input type="checkbox"/></div> </div> <div> <div>2</div> <div><input type="checkbox"/></div> </div> <div> <div>JA</div> <div>3</div> <div><input checked="" type="checkbox"/></div> </div>	<p>Der Dübelkreis wird mit hoher Priorität eingestuft und im Projekt weiterhin betrachtet.</p> <p>Hübner: Einsatz von Vollwandquerschnitten in Bezug auf Wirtschaftlichkeit und Leistungsfähigkeit überprüfen. Selten in NH-Konstruktionen.</p>	
	<input type="checkbox"/> Rahmenecke, Dübelkreis mit Dübeln besonderer Bauart 	<input type="checkbox"/> Dübelkreis, Haas Fertigbau (2015) 	<div> <div>NEIN</div> <div>0</div> <div><input checked="" type="checkbox"/></div> </div> <div> <div>1</div> <div><input type="checkbox"/></div> </div> <div> <div>2</div> <div><input type="checkbox"/></div> </div> <div> <div>JA</div> <div>3</div> <div><input type="checkbox"/></div> </div>	<p>Verbindungen mit Dübeln besonderer Bauart werden als nicht relevant eingestuft.</p> <p>Hübner: Für Berechnungen sind Werte unbekannt.</p>	



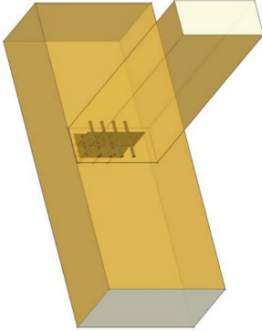



Querkraftanschluss	<input type="checkbox"/> Haupt-Nebenträgeranschluss mit Stabdübeln 	<input type="checkbox"/> Simpson (2015) 	<table><tr><td>NEIN 0</td><td>1</td><td>2</td><td>JA 3</td></tr><tr><td><input type="checkbox"/></td><td><input type="checkbox"/></td><td><input checked="" type="checkbox"/></td><td><input type="checkbox"/></td></tr></table>	NEIN 0	1	2	JA 3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Die Bewertung der Verbindung erfolgt im Zusammenhang mit dem Kapitel der Systemverbinder.
NEIN 0	1	2	JA 3									
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>									
Querzug, Verstärkung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<table><tr><td>NEIN 0</td><td>1</td><td>2</td><td>JA 3</td></tr><tr><td><input checked="" type="checkbox"/></td><td><input type="checkbox"/></td><td><input type="checkbox"/></td><td><input type="checkbox"/></td></tr></table>	NEIN 0	1	2	JA 3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Klicken Sie hier, um Text einzugeben.
NEIN 0	1	2	JA 3									
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>									
Querdruck, Auflager, Verstärkung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<table><tr><td>NEIN 0</td><td>1</td><td>2</td><td>JA 3</td></tr><tr><td><input checked="" type="checkbox"/></td><td><input type="checkbox"/></td><td><input type="checkbox"/></td><td><input type="checkbox"/></td></tr></table>	NEIN 0	1	2	JA 3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Klicken Sie hier, um Text einzugeben.
NEIN 0	1	2	JA 3									
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>									

A.6 Systemverbinder

Zug/Druck (, ⊥ zur Faser)	Systemskizze	Praxisbeispiel	Bewertung für Laubholz					Anmerkungen
			NEIN 0	1	2	3 JA		
	<input type="checkbox"/> Nagelplattenverbinder 	<input type="checkbox"/> Nagelplattenverbinding, Lignum (2010)  	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		Die Nagelplattenverbinder werden als nicht relevant eingestuft und nicht weiter betrachtet. Hübner: zu hohe Rohdichte für Nagelplatten
	<input type="checkbox"/> Stützenfuss, Eurotec (2015) 	<input type="checkbox"/> Gelenkiger Stützenfuss, Eurotec (2015) 	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		Diese Verbindung ist durch die Betrachtung der Schraubenverbindungen abgedeckt.
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		Klicken Sie hier, um Text einzugeben.
Moment			<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		

Querkraftan- schluss	<input type="checkbox"/> SIHGA Zuganschluss, SIHGA (2015) 	<input type="checkbox"/> SIHGA Haupt-Nebenträgeranschluss, SIHGA (2015) 	<input type="checkbox"/> Sherpa Haupt-Nebenträgerabschluss 	<input type="checkbox"/> Balkenschuh 	<input type="checkbox"/> Sherpa Haupt- Nebenträgerabschluss, Augustin (2009) 	<input type="checkbox"/> Simpson (2015) 	Die Verbindung wird als nicht relevant ange- sehen.			
							NEIN	0	<input checked="" type="checkbox"/>	
							JA	1	<input type="checkbox"/>	
							JA	2	<input type="checkbox"/>	
Die Verbindung ist durch die Betrachtung der Schrauben- und Randabstände gegeben.	<input type="checkbox"/> SIHGA Zuganschluss, SIHGA (2015) 	<input type="checkbox"/> SIHGA Haupt-Nebenträgeranschluss, SIHGA (2015) 	<input type="checkbox"/> Sherpa Haupt-Nebenträgerabschluss 	<input type="checkbox"/> Balkenschuh 	<input type="checkbox"/> Sherpa Haupt- Nebenträgerabschluss, Augustin (2009) 	<input type="checkbox"/> Simpson (2015) 	NEIN	0	<input type="checkbox"/>	
							JA	1	<input type="checkbox"/>	
							JA	2	<input checked="" type="checkbox"/>	
							JA	3	<input type="checkbox"/>	
Die Verbindung wird als nicht relevant ange- sehen.	<input type="checkbox"/> SIHGA Zuganschluss, SIHGA (2015) 	<input type="checkbox"/> SIHGA Haupt-Nebenträgeranschluss, SIHGA (2015) 	<input type="checkbox"/> Sherpa Haupt-Nebenträgerabschluss 	<input type="checkbox"/> Balkenschuh 	<input type="checkbox"/> Sherpa Haupt- Nebenträgerabschluss, Augustin (2009) 	<input type="checkbox"/> Simpson (2015) 	NEIN	0	<input checked="" type="checkbox"/>	
							JA	1	<input type="checkbox"/>	
							JA	2	<input type="checkbox"/>	
							JA	3	<input type="checkbox"/>	

Querkraftan- schluss	<input type="checkbox"/> SIHGA Zuganschluss, SIHGA (2015) 	<input type="checkbox"/> SIHGA Haupt-Nebenträgeranschluss, SIHGA (2015) 	Die Verbindung wird als nicht relevant ange- sehen.			
			NEIN	0	<input checked="" type="checkbox"/>	
			1	<input type="checkbox"/>		
			2	<input type="checkbox"/>		
			3	<input type="checkbox"/>		
Sherpa Haupt- Nebenträgerabschluss	<input type="checkbox"/> Sherpa Haupt- Nebenträgerabschluss, Augustin (2009) 	<input type="checkbox"/> Sherpa Haupt-Nebenträgerabschluss 	Die Verbindung ist durch die Betrachtung der Schrauben- und Randabstände gegeben.			
			NEIN	0	<input type="checkbox"/>	
			1	<input type="checkbox"/>		
			2	<input checked="" type="checkbox"/>		
			3	<input type="checkbox"/>		
Balkenschuh	<input type="checkbox"/> Simpson (2015) 	<input type="checkbox"/> Balkenschuh 	Die Verbindung wird als nicht relevant ange- sehen.			
			NEIN	0	<input checked="" type="checkbox"/>	
			1	<input type="checkbox"/>		
			2	<input type="checkbox"/>		
			3	<input type="checkbox"/>		

Querkraftan- schluss	<input type="checkbox"/> Wabafix Haupt-Nebenträgeranschluss (SIHGA 2015)		<input type="checkbox"/> Wabafix Haupt-Nebenträgeranschluss, SIHGA (2015)		<div> <div>NEIN</div> <div>0</div> <div><input checked="" type="checkbox"/></div> </div> <div> <div>JA</div> <div>3</div> <div><input type="checkbox"/></div> </div>	Die Verbindung wird als nicht relevant angesehen.
	<input type="checkbox"/> Haupt-Nebenträger mit Stabdübeln		<input type="checkbox"/> Simpson (2015)		<div> <div>NEIN</div> <div>0</div> <div><input type="checkbox"/></div> </div> <div> <div>JA</div> <div>3</div> <div><input type="checkbox"/></div> </div>	Ausgewählte Systemverbinder können mitgetestet werden. Denkbar wäre die Entwicklung neuer Geometrien der Systemverbinder, ist jedoch nicht Bestandteil des Projektes. Keine hohe Priorität und Relevanz innerhalb des Projektes.
	<input type="checkbox"/> ICST Elementverbinder Auflager und Querschluss, Simpson (2015)		<input type="checkbox"/> ICST Elementverbinder Auflager und Querschluss, Simpson (2015)		<div> <div>NEIN</div> <div>0</div> <div><input checked="" type="checkbox"/></div> </div> <div> <div>JA</div> <div>3</div> <div><input type="checkbox"/></div> </div>	Die Verbindung wird als nicht relevant angesehen.
Querzug, Verstärkung	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>		<div> <div>NEIN</div> <div>0</div> <div><input checked="" type="checkbox"/></div> </div> <div> <div>JA</div> <div>3</div> <div><input type="checkbox"/></div> </div>	Klicken Sie hier, um Text einzugeben.
Querdruck, Auflager, Verstärkung	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>		<div> <div>NEIN</div> <div>0</div> <div><input checked="" type="checkbox"/></div> </div> <div> <div>JA</div> <div>3</div> <div><input type="checkbox"/></div> </div>	

A.7 Kontaktanschlüsse/ Holz-Holz Verbindungen

Zug/Druck (, ⊥ zur Faser)	Systemskizze	Praxisbeispiel	Bewertung für Laubholz					Anmerkungen
			NEIN 0	1	2	3	JA	
	<div> <div> <input type="checkbox"/> Versätze </div>  </div>	<div> <input type="checkbox"/> Stirnversatz, Scharmacher (2013) </div> 	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<div> <div> <div>JA</div> <div>3</div> </div> </div>	Die Verbindung wird als wichtig eingestuft, da Buche eine gute Querdruktragfähigkeit hat. Bei den Versuchen muss die Lagesicherheit mitbetrachtet werden.
	<div> <div> <input type="checkbox"/> Treppenversatz, Enders-Comberg (2015) </div>  </div>	<div> <input type="checkbox"/> Enders-Comberg (2015) </div> 	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<div> <div> <div>JA</div> <div>3</div> </div> </div>	Die Verbindung wird als wichtig eingestuft, da Buche eine gute Querdruktragfähigkeit hat. Bei den Versuchen muss die Lagesicherheit mitbetrachtet werden.
	<div> <div> <input type="checkbox"/> Zapfenverbindung </div>  </div>	<div> <input type="checkbox"/> www.tischlereicenter.eu </div> 	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<div> <div> <div>JA</div> <div>3</div> </div> </div>	Die Verbindung wird weiter betrachtet.
Moment	<div> <input type="checkbox"/> </div>	<div> <input type="checkbox"/> </div>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<div> <div> <div>JA</div> <div>3</div> </div> </div>	Klicken Sie hier, um Text einzugeben.

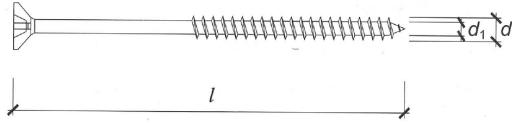
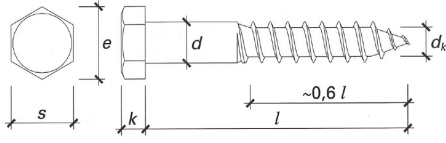
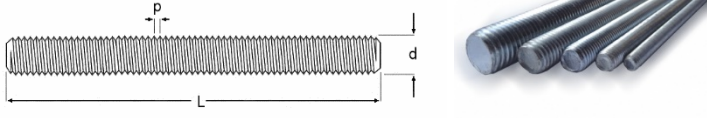
Querkraft- anschluss	<input type="checkbox"/> Schwalbenschwanzverbindung 	<input type="checkbox"/> Enders-Comberg (2015) 	Die Verbindung wird weiter betrachtet.			
			NEIN 0	1	2	JA 3
			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Querkraft- anschluss	<input type="checkbox"/> Verbindung mit innerer Lochplattenverstärkung, (Tschuemperlin 2013) 	Diese Art der Verbindung wird mit geringer Relevanz eingestuft, da Sonderfälle. Ermittlung eventuell mit gewonnenen Kennwerten möglich, allenfalls durch gesonderte Tests zu bestimmen.				
			NEIN 0	1	2	JA 3
			<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Querkraft- Verstärkung	<input type="checkbox"/>	Klicken Sie hier, um Text einzugeben.				
			NEIN 0	1	2	JA 3
			<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Querkraft- Auflager- Verstärkung	<input type="checkbox"/>	Klicken Sie hier, um Text einzugeben.				
			NEIN 0	1	2	JA 3
			<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

B Begriffe und Definitionen zu den Verbindungsmitteln

Für die diskutierten Verbindungsmittel sind Richtgrössen und Abbildungen in Tab. 3 angegeben.

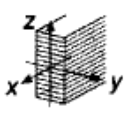
Tab. 3: Verbindungsmittel

<p>Stabdübel</p>	<div data-bbox="411 488 1066 539" data-label="Image"> </div> <ul style="list-style-type: none"> - $d = 6 - 30 \text{ mm}$; - Bohrloch im Holz gleich Nenndurchmesser des Stabdübels - Bohrloch im Stahl +1 mm als Nenndurchmesser - innenliegende Stahlbleche <p>Festigkeiten: S235, S275, S355</p>
<p>Passbolzen/ Passschraube</p>	<div data-bbox="405 792 863 920" data-label="Image"> </div> <ul style="list-style-type: none"> - $d = 6 - 30 \text{ mm}$; - Bohrloch im Holz gleich Nenndurchmesser des Passbolzen - Bohrloch im Stahl +1 mm als Nenndurchmesser - Innen-, aussenliegende Stahlbleche <p>Festigkeiten: S235, S275, S355</p>
<p>Bolzen/ Bauschrauben</p>	<div data-bbox="408 1171 1066 1384" data-label="Image"> </div> <ul style="list-style-type: none"> - $d = 6 - 30 \text{ mm}$; - mit Kopf und Mutter, zwingend Unterlegscheibe mit Seitenlänge/ Durchmesser von $3d$, Dicke mind. $0.3d$ - mit geringen Spiel eingebaut; anschliessend fest angezogen - Bohrloch im Holz gleich +1 mm als Nenndurchmesser des Bolzen - Nicht in permanenten Bauten <p>Festigkeitsklassen: 4.8, 5.6, 8.8, ...</p>
<p>Selbstbohrende Schrauben SN EN 14592,</p>	<div data-bbox="411 1697 879 1816" data-label="Image"> </div>

<p>Schrauben mit gewalztem Gewinde, SN EN 14592</p>	
<p>Schrauben mit geschnittenem Gewinde, DIN 7998</p>	
<p>Gewindestangen</p>	

C Festigkeitskennwerte für Laubholz

C.1 Brettschichtholz aus Laubholz Auszug aus Strahm (2014)

 Festigkeitsklassen				BSH - Laubholzklassen ⁴⁾			
				GL 40k	GL 40h	GL 48k	GL 48h
Kennzeichnende Eigenschaften ¹⁾							
– Biegefestigkeit	$f_{m,k}$	N/mm ²		40	40	48	48
– mittlerer Biege-E-Modul	$E_{m,mean}$	kN/mm ²		14	14	15	15
Bemessungswerte ¹⁾							
Festigkeit	Biegung	$f_{m,d}$	N/mm ²	26,5	26,5	32	32
	Zug parallel zur Faser	$f_{t,0,d}$	N/mm ²	20	22	22	25
	Druck parallel zur Faser	$f_{c,0,d}$	N/mm ²	22	25	25	28
	Zug senkrecht zur Faser	$f_{t,90,d}$	N/mm ²	0,25	0,25	0,25	0,25
	Druck senkrecht zur Faser	$f_{c,90,d}$					
	– generell		N/mm ²	4,5	4,5	5,0	5,0
	– mit Vorholz ³⁾		N/mm ²	6,3	6,3	7,0	7,0
	– Endauflagerung		N/mm ²	5,0	5,0	6,0	6,0
	Schub	$f_{v,d}$	N/mm ²	3,0	3,0	3,0	3,0
Verformung	$E_{0,mean}$ in Faserrichtung ²⁾	$\left\{ \begin{matrix} E_{m,mean} \\ E_{t,0,mean} \\ E_{c,0,mean} \end{matrix} \right\}$	kN/mm ²	14	14	15	15
	$E_{90,mean}$ senkr. zur Faser ²⁾	$\left\{ \begin{matrix} E_{t,90,mean} \\ E_{c,90,mean} \end{matrix} \right\}$	kN/mm ²	1,0	1,0	1,0	1,0
	Schubmodul ²⁾	G_{mean}	kN/mm ²	1,0	1,0	1,0	1,0
	Rohdichte	ρ_k	kg/m ³	550	580	600	620

1. Eigenschaften und Bemessungswerte beziehen sich auf eine Holzfeuchte von 12%.
2. 5%-Fraktilwerte sind auf das 0,85-Fache der Mittelwerte festgelegt.
3. Das Vorholz muss beidseitig mindestens 100 mm betragen, andernfalls ist mit dem generellen Wert zu rechnen.
4. Für n'H-Produktion und Laubholzarten Esche und Buche; für andere Holzarten nach Anfrage.

Der Bemessungswert der Rollschubfestigkeit $f_{r,d}$ darf für alle Festigkeitsklassen zu 1,5 N/mm² in Rechnung gestellt werden.

Der zur Rollschubbeanspruchung gehörende Rollschubmodul darf mit $G_{r,mean} = 0,20 \cdot G_{mean}$ angenommen werden.

Obige Bemessungswerte beziehen sich auf folgende Referenzabmessungen; für andere Abmessungen sind die Korrekturen zu beachten.

Biegung: für $h = 600$ mm; für andere Werte (bis 1,80 m) keine Korrekturen

Zug parallel zur Faser: b oder $h = 300$ mm und $l = 3'600$ mm; für grössere Werte mit $k_{t,size}$ multiplizieren:
 $k_{t,size} = (300/b)^{0,1}$ oder $(300/h)^{0,1}$ bzw. $(3'600/l)^{0,1}$, wobei $k_{t,size} \leq 1,0$

Druck parallel zur Faser: keine Korrekturen

Zug senkrecht zur Faser: gleichmässig beanspruchtes Volumen = 0,1 m³; für grössere Werte mit $k_{size} = (0,1/\text{Volumen})^{0,1}$ multiplizieren.

Druck senkrecht zur Faser: keine Korrekturen für generellen Wert.

Schub: für gleichmässig beanspruchte Schubfläche parallel zur Faser $A_{shear} = 160'000$ mm²; für andere Werte multiplizieren mit $k_{shear,size} = (160'000/A_{shear})^{0,28} \leq 1,2$.

(Definition A_{shear} : Scherlänge unter V_{max} · Trägerbreite b in mm²)

Modul 2/3, Teil A

Verbindungen mit Stabdübeln

Autoren: Steffen Franke, Bettina Franke

Mitarbeitende: Elisabeth Naderer, Sebastian Heubuch, Ivana Krajnović

Berner Fachhochschule, Institut für Holzbau, Tragwerke und Architektur

Inhaltsverzeichnis

1	Allgemeines	3
1.1	Informativ	3
1.2	Festlegungen zu den Versuchsprogramm	3
2	Material	4
2.1	Rohmaterial und Brettschichtholz.....	4
2.2	Stabdübel	5
3	Vorversuche Einbringen der Stabdübel	7
3.1	Allgemein.....	7
3.2	Einteilige Prüfkörper	7
4	Vorversuche Tragfähigkeit von Stabdübelverbindungen	11
4.1	Herstellung der Prüfkörper.....	11
4.2	Getestete Verbindungen	11
4.3	Versuchsaufbau und Durchführung	12
4.4	Auswertungsschema	13
4.5	Versagensmechanismen	14
4.6	Ergebnisse parallel zur Faserrichtung	15
4.7	Ergebnisse rechtwinklig zur Faserrichtung - Verbindungen mit mehreren Stabdübeln ..	32
4.8	Ergebnisse rechtwinklig zur Faserrichtung - ein Verbindungsmittel	35
4.9	Verbindungen mit Passbolzen	38
5	Hauptversuchsserien	42
5.1	Einführend	42
5.2	Parallel zur Faserrichtung.....	42
5.3	Senkrecht zur Faserrichtung	48
6	Diskussion der Ergebnisse	56
6.1	Mindestrand- und Mindestverbindungsmitteleabstände	56
6.2	Grundlagenparameter Lochleibungsfestigkeiten.....	57
6.3	Anzahl der Verbindungsmittel in Lastrichtung.....	57
6.4	Tragfähigkeit und Bemessung	58
7	Zusammenfassung	67
8	Literaturverzeichnis	68

1 Allgemeines

1.1 Informativ

Für Verbindungen mit Stabdübeln sind im Folgenden die Ergebnisse aus den Modul 2 «Durchführung der Versuchsreihen» und dem Modul 3 «Erarbeitung von Bemessungsgrundlagen» aufgeführt. Die Bearbeitung erfolgte vorrangig durch die Berner Fachhochschule, des Instituts für Holzbau, Tragwerke und Architektur HTA. Im Hauptversuchsprogramm wurden Prüfungen an der ETH Zürich, Institut für Baustatik und Konstruktion durchgeführt und begleitet. Die Forschungsergebnisse stützen sich weiterhin auf die erfolgreich abgeschlossenen resp. bearbeiteten Bachelor und Masterthesen. Den Studierenden/Absolventen wird ganz herzlich für die Mitarbeit gedankt.

- Charles Mulenga (2017) Investigations on effective number of fasteners in multiple fastener steel to timber hardwood connections, Master Thesis, BFH-AHB
- Chuan-Hou Chang (2017) Numerical Modelling and Experimental Analysis of Step Joints in Hardwood, Master Thesis, BFH-AHB
- Möller J. K. (2017) Beech wood joint with dowel type fasteners - High performance in modern timber structures, Master Thesis, ETH Zürich
- Graffé Ch. (2019) High performance connections with dowel-type fasteners in beech laminated timber, Master Thesis, ETH Zürich
- Zeiter L. (2018) Leistungsfähige Verbindungen in Buchen Brettschichtholz, Master Thesis, ETH Zürich
- Bumann M. (2019), Untersuchung von Buchen Brettschichtholz im Anschlussbereich mit Scherpunkt Steifigkeit von Stabdübelverbindungen, Bachelor Thesis, BFH-AHB, voraussichtliche Abgabe Sept. 2019

1.2 Festlegungen zu den Versuchsprogramm

Das Versuchsprogramm gliedert sich in Vorversuchsserien und Hauptversuchsserien mit praxisrelevanten Geometrien in der Verbindung und Kräften in der Lastübertragungen. Die Planung der Hauptversuchsserien basiert auf den Ergebnissen aus den Vorversuchsreihen. In den experimentellen Untersuchungen sind Verbindungen mit einer Beanspruchung parallel zur Faser und senkrecht zur Faser unterschieden.

Die Resultate der Versuchsreihen dienen der Erarbeitung der Grundlagen für das Ausbilden duktiler Verbindungen in Buchenholz und somit der zuverlässigen Auslegung einer duktilen Verbindung in den Hauptversuchen. Dies wird zum einen durch das Erreichen des Versagensmodus III (Ausbildung von 2 Fliessgelenken pro Scherfuge) für die Verbindungen erreicht und zum anderen sind in Tabelle 11 der SIA 265:2012 als Anforderungen für duktile Verbindungen in Tragwerkstypen B mit einem Duktilitätsmass $D_s > 3$ die Einhaltung der Mindestabstände angegeben. Die Mindestabstände und Mindestholzdicken gemäss SIA 265:2012 werden daher als Basis/Ausgangswerte angenommen und für die Anwendung in Buche auf Grundlage des Duktilitätsmasses $D_s > 3$ bestimmt. Die Lochleibungsfestigkeiten werden aus der Literatur bezogen.

Die Vorversuche dienen der Untersuchung und Festlegung folgender Parameter:

- Einbringvoraussetzungen für Stabdübel/Passschrauben
 - Festlegung des erforderlichen Durchmessers zum Vorbohren in Buchenholz
 - Anwendbarkeit von selbstschneidenden Stabdübeln der Firma SFS
- Minimale und optimale Abstände zwischen Verbindungsmitteln: a_1
- Minimale und optimale Abstände zum beanspruchten Rand: a_3
- Einfluss der Anzahl an Verbindungsmitteln hintereinander: n_{ef}
- Einfluss der minimalen und optimalen Holzdicken: t
- Zugversuche mit Variation der Holzfeuchte

Die Hauptversuche dienen der weiteren Evaluierung der Bemessungsansätze mit grossen Verbindungen mit höheren Traglasten und berücksichtigen folgende Variationen:

- Parallel und senkrecht zur Faser beanspruchte Versuchsreihen
- Variation der Anzahl der Schlitzbleche, Durchmessers, Anzahl
- Zugversuche mit Exzentrizität $e = 20 \text{ mm}$
- Zugversuch mit ungleichmässig gebohrten Bohrlochraster

Neben den Versuchen an den Verbindungen werden Versuche an den Verbindungsmitteln selbst zur Bestimmung der effektiven Stahlqualität und des Fliessmoments durchgeführt.

Generell sieht das Versuchsprogramm notwendige Versuche vor, um die oben genannten Parameter bestimmen zu können. Das Programm ist daher umfassend aufgestellt und wurde unter Beachtung bereits erreichter Ergebnisse dynamisch angepasst und gekürzt (gekennzeichnet durch in Klammern gesetzte Versuchsreihen). Weiterhin werden Ergebnisse bei Folgeserien beachtet (gekennzeichnet: nach Ergebnissen n. E.).

2 Material

2.1 Rohmaterial und Brettschichtholz

Das Rohmaterial von gesamt ca. 180 m^3 Rundholz wurde durch die Burgergemeinden Biel und Burgdorf sowie der Raurica Wald AG aus den regionalen Wäldern eingeschnitten und zur Verfügung gestellt. Die Weiterverarbeitung zu Brettern mit 35 bis 40 mm Stärke, s. Abb. 1, erfolgt durch die Sägewerke Corbat, Krähenbühl und Koller sowie zu Bohlen mit 65 bis 70 mm Stärke, s. Abb. 2, im eigenen Sägewerk der BFH in Biel. Nach der Trocknung und Zwischenlagerung bei den Sägewerken wurden die Bretter an BSH Produzenten verteilt.

Die erste Charge, eingeschnitten bei der Firma Koller, wurde bei neue Holzbau AG zu BSH mit 30 mm Lamellenstärke, verklebt und an die Berner Fachhochschule (BFH) geliefert. Die weiteren Brettschichtholzträger wurden bei der Roth Burgdorf AG hergestellt. Die Herstellung erfolgte jeweils nach den Anforderungen der SN EN 14080:2013. Es wurden keine Keilzinken ausgeführt. Zur Herstellung wurde Melamin-Harnstoff-Formaldehyd (MUF) respektive Polyurethan Klebstoff eingesetzt.

Die Versuchskörper wurden in einem weiteren Teil aus Vollholzbohlen ca. $65 \times 190 \text{ mm}$ (geschnitten und getrocknet an der Berner Fachhochschule, s. Abb. 2) und BSH-Trägern je nach Abmessung geschnitten. Die Herstellung der Versuchskörper der Stabdübelversuche erfolgt vorrangig im Technologiepark der Berner Fachhochschule (BFH). Die Versuchskörper der grösseren Verbindungen wurden direkt bei der Roth Burgdorf AG angefertigt.

Die Rohdichten der eingeschnittenen Bretter wurden stichprobenartig bei der Roth Burgdorf AG ermittelt. Dabei wurden bei etwa 10 % der Bretter die Rohdichten bestimmt. Der Mittelwert liegt bei $\rho = 710 \text{ kg/m}^3$ mit einem Variationskoeffizienten von 5.1 %. Der minimal gemessene Wert lag bei $\rho = 638 \text{ kg/m}^3$ und der Maximalwert bei $\rho = 792 \text{ kg/m}^3$. Die Verteilung der Häufigkeit der Rohdichte der Lamellen ist in Abb. 3 dargestellt.

Die Rohdichten der einzelnen Prüfkörper sind innerhalb der Prüfungen bestimmt und in der Auswertung separat berücksichtigt. Die Verteilung der Rohdichten ist in Abb. 4 dargestellt. Als Mittelwert ergibt sich 723 kg/m^3 mit einer Variation von 3.5 %. Die charakteristische Rohdichte von 684 kg/m^3 liegt leicht über der im TP 1 festgelegten von 670 kg/m^3 . 75 % der Prüfkörper liegen innerhalb der 1-Sigma Umgebung. Die Prüfkörper sind bis zur Prüfung im Normalklima bei 20°C und 65 % rel. Luftfeuchte bis Massekonstanz gelagert worden. Die mittlere Holzfeuchte betrug 9.5 % mit einem Variationskoeffizient von 10.3 %.



Abb. 1: Eingeschnittene Buchenbretter bei der Roth Burgdorf AG gelagert



Abb. 2: Eingeschnittene Buchenbohlen an der BFH-AHB gelagert

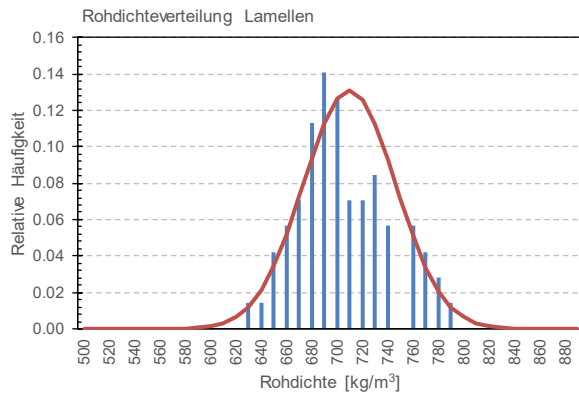


Abb. 3: Rohdichteverteilung der bei der Roth Burgdorf AG gemessenen Bretter

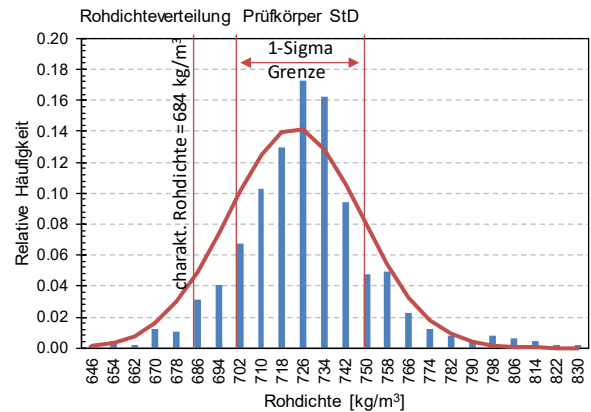


Abb. 4: Rohdichteverteilung der Prüfkörper

2.2 Stabdübel

2.2.1 Zugfestigkeit

Die im Versuchsprogramm verwendeten Stabdübel entsprechen der Festigkeitsklasse S235JR laut Herstellerangaben. Die Festigkeit der Stabdübel wurde in Zugversuchen nach SN EN ISO 6892-1:2010 geprüft. Die Stabdübel wurden über Klemmbacken in der Prüfmaschine belastet. Die Prüfungsgeschwindigkeit bis zum Erreichen der Streckgrenze betrug 30 MPa/s und anschliessend 0.5 mm/min. Die Versuche wurden bis zum Bruch belastet. Der Prüfaufbau ist in Abb. 5 dargestellt. In Abb. 6 sind die Belastungskurven exemplarisch gezeigt und in Tab. 1 die Stahlzugfestigkeiten als Mittelwert und charakteristischer Wert gegenübergestellt. Die Bestimmung des charakteristischen Wertes erfolgte nach EN 14358:2016. Die Mindestzugfestigkeit für S235JR liegt bei 360 MPa und wurde mit den geprüften Stabdübeln deutlich überschritten, siehe Tab. 1.

Tab. 1: Stahlfestigkeiten der verwendeten Stabdübel

Stabdübel Ø [mm]	Prüfungen n [-]	$f_{u,mean}$ [MPa]	$f_{u,k}$ [MPa]
8.0	3	606	589
10.0	5	605	587
12.0	5	769	757

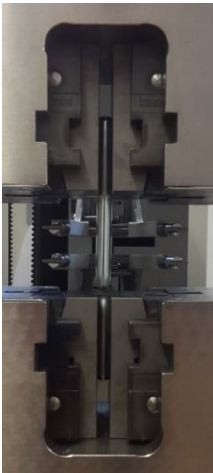


Abb. 5: Prüfaufbau
Stahlzugfestigkeit von
Stabdübeln

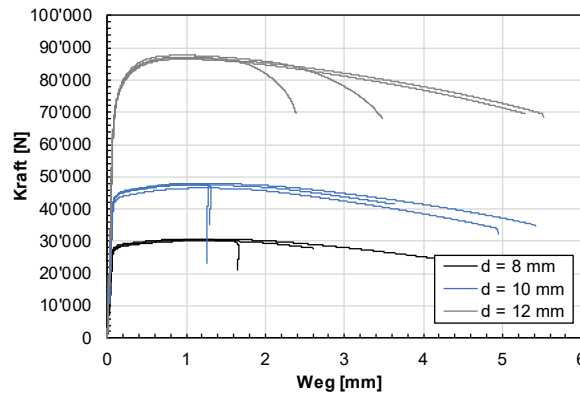


Abb. 6: Kraft-Weg Diagramm unter Zugbelastung für
Stabdübel

2.2.2 Biegefestigkeit

Die Biegefestigkeit wurde in einem Dreipunktbiegeversuch nach ISO 10984-1:2009 bestimmt. Die im Versuchsprogramm verwendeten Stabdübel entsprechen der Festigkeitsklasse S235JR laut Herstellerangaben. Die Stützweite betrug 88 mm > min 4d, die betrachteten Durchmesser 8 mm, 10 mm, 12 mm und 16 mm. Die Belastung erfolgte weggesteuert mit einer Prüfgeschwindigkeit von 5 mm/min. Anhand der Ergebnisse wurde das Fliessmoment $M_{y,b}$ und die Streckgrenze $f_{y,b}$ nach (1) und (2) bestimmt.

$$M_{y,b} = \frac{F_y \cdot l}{4} \quad (1)$$

$$f_{y,b} = \frac{M_y}{S} = \frac{M_y}{D^3 / 6} \quad (2)$$

Die erhaltenen Ergebnisse zeigen erneut eine deutlich höhere Festigkeit als angegeben.

Tab. 2: Fliessmoment und Streckgrenze für Stabdübel aus Biegeversuch

Stabdübel Ø [mm]	Prüfungen n [-]	$M_{y,b,mean}$ [Nmm]	$f_{y,b,mean}$ [N/mm ²]	$M_{y,b,5\%}$ [Nmm]	$f_{y,b,5\%}$ [N/mm ²]
d8	12	54'595	640	50'789	596
d10	10	102'635	616	96'681	581
d12	10	199'157	691	193'750	673
d16	8	455'698	668	454'106	649
d20	5	874'243	656	857'010	643

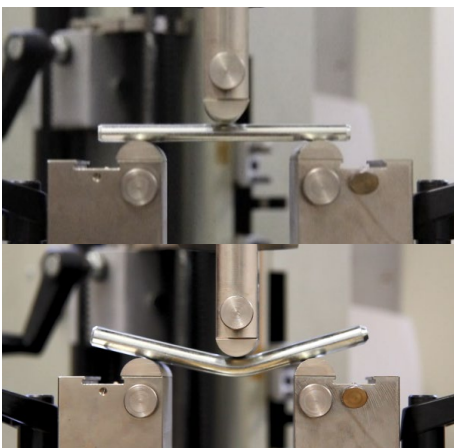


Abb. 7: 3-Punkt-Biegeversuch von Stabdübeln, unbelastet (oben), belastet (unten)

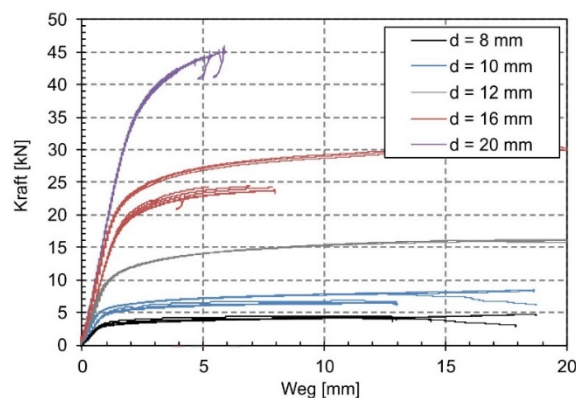


Abb. 8: Kraft-Verschiebungsdiagramm für Stabdübel im
3-Punkt-Biegeversuch

3 Vorversuche Einbringen der Stabdübel

3.1 Allgemein

Buchenholz weist natürlich höhere Festigkeiten und Härte gegenüber Nadelholz auf, weshalb das Einbringverhalten von Stabdübeln untersucht wurde. Für Bolzen ist ein Lochspiel von 1 mm zulässig lt. SIA 265:2012, Abschnitt 8.5. Bolzen werden in der Regel mit Kopf und Mutter ausgeführt, was zum Kraftschluss führt, bei Schwindvorgängen muss bei Bolzenverbindungen ein nachziehen erfolgen. Stabdübel besitzen keinen Kopf und Mutter und werden passgenau, ohne Lochspiel, in das Holz eingetrieben. Der Lochdurchmesser der Stahlbleche darf max. 1 mm grösser sein als der Nenndurchmesser des Stabdübel lt. SIA 265:2012, Abschnitt 8.5.

Das Einbringen von Stabdübeln wurde in ausführenden Holzbaufirmen unter praxisnahen Bedingungen und im Labor durch Aufzeichnung von Kraft-Weg-Diagrammen bewertet. Das Versuchsprogramm umfasst ein- und zweiteilige Prüfkörper mit variierenden Lochdurchmessern.

3.2 Einteilige Prüfkörper

3.2.1 Prüfungen in der Praxis

Das Einbringen der Stabdübel wurden gemeinsam mit Holzbau Firmen der Schweiz durchgeführt.

Blumer-Lehmann AG, CH-9200 Gossau

28.02.2017

Anwesende Personen:

Kurt Breitenmoser, Blumer-Lehmann AG

Patrick Huser, Blumer-Lehmann AG

Prof. Dr. Steffen Franke, Berner Fachhochschule

Durchführung am Prüfkörper 1 und 3

Die Stabdübel wurden manuell mit Hilfe eines Schlagwerkzeugs (Hammer/Beil) eingebracht, s. Abb. 9.

Nach einer Diskussion im Team, wurden – basierend auf den Ergebnissen und Erfahrungswerten in der Praxis – die Bohrl Lochdurchmesser bewertet, s. Tab.3.



Abb. 9: Einbringen der Stabdübel

Tab. 3: Einbringverhalten von Bolzen in unterschiedliche Vorbohr Löcher

Stabdübel Ø [mm]	Bohrloch Ø [mm]	Einbringverhalten der Stabdübel
8	8.2	lose
	8.1	gut
	8.0	zu streng
10	10.1	gut
	10.0	zu streng
12	12.6	lose
	12.1	gut
	12.0	zu streng
16	17.0	lose
	16.0	zu streng

3.2.2 Quantifizierung der Einbringkraft an einteiligen Prüfkörpern

Zur technischen Quantifizierung der Einbringkräfte wurden die erforderlichen Einbringkräfte an einteiligen Prüfkörpern mit unterschiedlichen Holzfeuchten und Bohrlochdurchmessern gemessen. Die Bohrlochdurchmesser waren d und $d + 0.1$ mm für Stabdübel mit 8 und 12 mm Durchmesser. Insgesamt sind 12 einteilige Prüfkörper mit jeweils 6 Bohrungen aus Brettschichtholz mit einer Mittelholzdicke von 90 mm vorbereitet, vgl. Tab. 4. Die Prüfkörper sind vor der Herstellung der Bohrlöcher im Normalklima bei 20°C und 65 % relative Luftfeuchte bis Massenkonstanz gelagert wurden. Das Vorbohren erfolgte mittels einer Ständerbohrmaschine und Bohrtisch im Technologiepark. Die Prüfkörper der Serien zur Abtrocknung und zur Auffeuchtung wurden im Anschluss an die Herstellung bei 23°/50 % und 20°/70 % bis Massenkonstanz gelagert. Die Holzfeuchte wurde im Anschluss an die Versuchsdurchführung anhand von Darrproben bestimmt.

Die Einbringkräfte der Stabdübel in die definierten Bohrlöcher wurden mit einer Zug-Druck-Prüfmaschine (Zwick/Roell 2030, Nennkraft 30 kN) ermittelt. Geprüft wurden je 6 Löcher pro Durchmesser, indem die Dübel mittels Prüfmaschine bei einer Prüfgeschwindigkeit von 80 mm/min bis mindestens Unterkante Prüfkörper eingefahren wurden. Die Kraft/Verschiebungsdiagramme jeder Prüfung wurden durch lineare Regression linearisiert zur Auswertung der erforderlichen Kraft bei einer konstante Einbringtiefe von 80 mm.

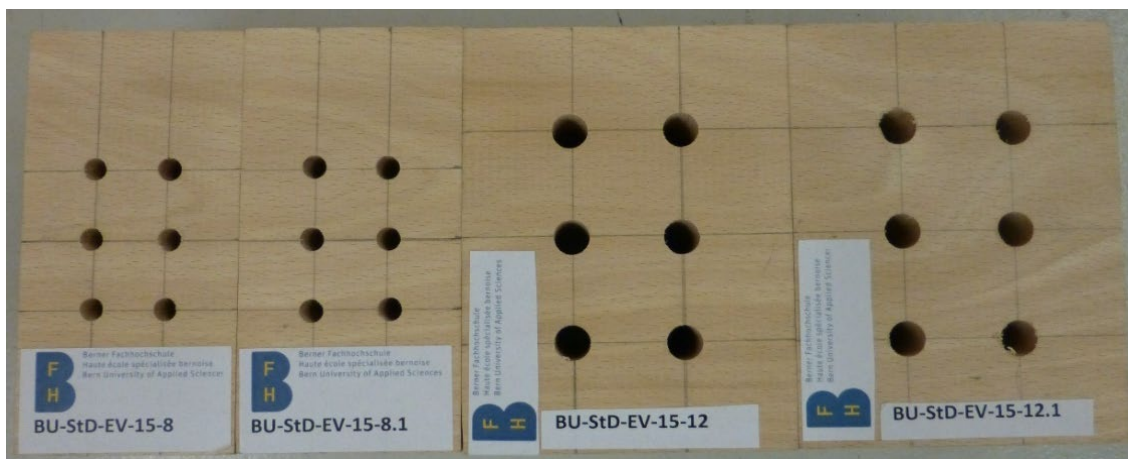


Abb. 10: Bohrlochlayout der Prüfkörperserie 3, $u = 15$ %, $d = 8.0, 8.1, 12.0, 12.1$ mm (v. l. n. r.)

Tab. 4: Einbringverhalten von Bolzen in unterschiedliche Vorbohrlöcher

	Bezeichnung	Bohrloch Ø d	Holzfeuchte u	Lagerklima
Serie 1	BU-StD-EV-12-8	8.0 mm	12 %	20°/65 %
	BU-StD-EV-12-8.1	8.1 mm		
	BU-StD-EV-12-12	12.0 mm		
	BU-StD-EV-12-12.1	12.1 mm		
Serie 2	BU-StD-EV-8-8	8.0 mm	8 %	20°/50 %
	BU-StD-EV-8-8.1	8.1 mm		
	BU-StD-EV-8-12	12.0 mm		
	BU-StD-EV-8-12.1	12.1 mm		
Serie 3	BU-StD-EV-15-8	8.0 mm	15 %	20°/70 %
	BU-StD-EV-15-8.1	8.1 mm		
	BU-StD-EV-15-12	12.0 mm		
	BU-StD-EV-15-12.1	12.1 mm		

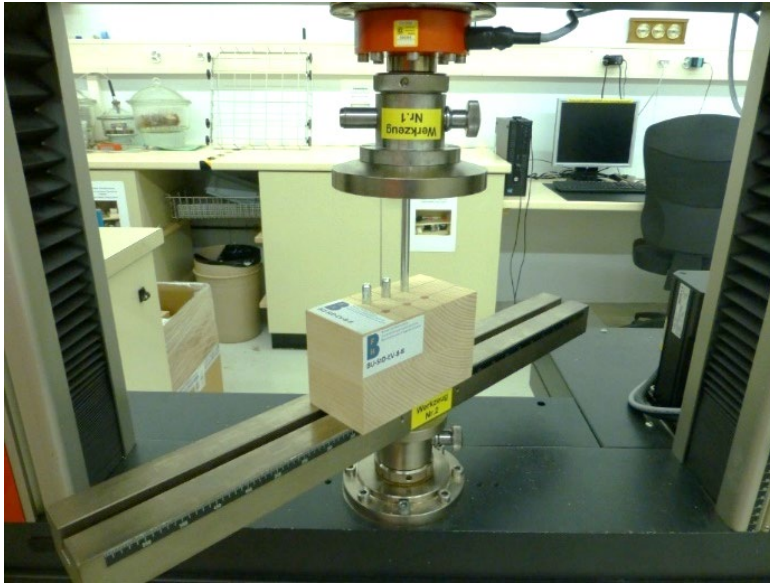


Abb. 11: Einbringen der Stabdübel mit Prüfmaschine, Prüfserie 2

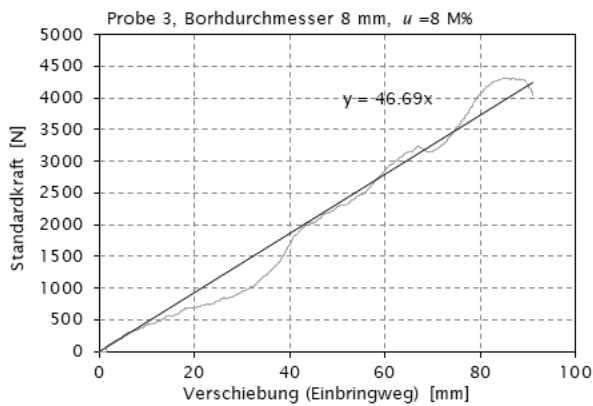


Abb. 12: Linearisierung der Kraft-Verschiebungsdiagramme zur Bestimmung der erforderlichen Kraft bei 80 mm Einbringweg

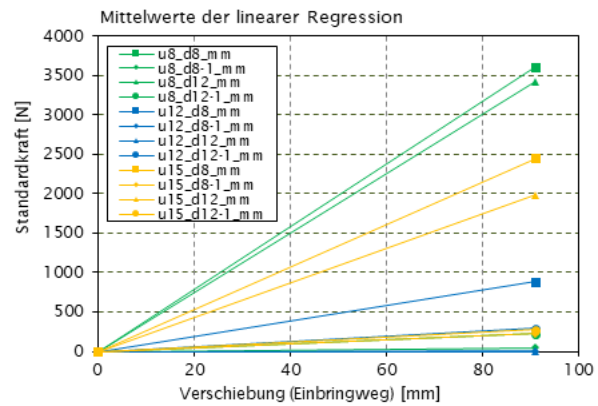


Abb. 13: Darstellung der Einbringkräfte in Abhängigkeit vom Einbringweg aus linearer Regression, für $d = 8, 8.1, 12, 12.1 \text{ mm}$ und $u = 8, 12, 15 \text{ \%}$

3.2.3 Zweiteilige Prüfkörper

Die Einbringkräfte der Stabdübel in die Bohrlöcher wurden mit einer Zug-Druck-Prüfmaschine (Zwick/Roell Z050, Nennkraft 50 kN) ermittelt. Geprüft wurden 15 Löcher pro Lasche, indem die Dübel mittels Prüfmaschine bei einer Prüfgeschwindigkeit von 80 mm/min bis kurz vor Unterkante in Prüfkörper eingefahren wurden, s. Abb. 14. Die dabei entstandenen Kräfte wurden dokumentiert und im Kapitel 4.4.3 ausgewertet. Das Prüfprogramm setzt sich wie folgt zusammen:

Prüfkörper 4 und 5, Prüfung am 08.03.2017:

- Geprüfte Bohrlöcher: $\varnothing 12.0 \text{ mm}$ und 12.1 mm

Wie bei den einteiligen Prüfkörpern ergeben sich prinzipiell auch ca. lineare Zusammenhänge zwischen der Prüfkörperdicke = Eindringtiefe und der Kraft, Abb. 15. Deutlich ersichtlich ist der Übergang vom 1. zum 2. Prüfkörper. Hier kommt es zu einem Kraftabfall bzw. einer Stagnation. Auch hier zeigen sich kleinere Kräfte bei grösserem Durchmesser. Alle Lastdiagramme sind im Anhang A dargestellt.

Beim zweiteiligen Prüfkörper liegen die Kräfte auch für $d + 0.1 \text{ mm}$ vorgebohrte Löcher im Mittel bei 1.5 kN, so dass bei mehrteiligen Verbindungen oder Verbindungen mit mehreren Schlitzblechen von höheren Kräften für das Einbringen ausgegangen werden muss.

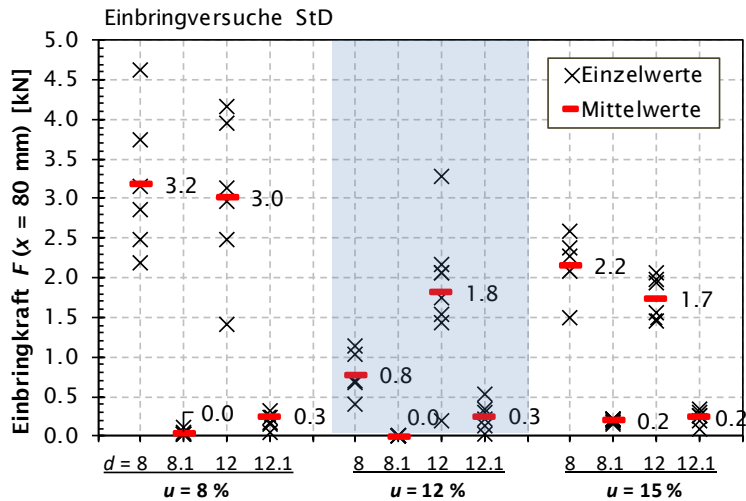


Abb. 16: Variation der Holzfeuchte bei den Einbringversuchen



Abb. 14: Einbringen der Stabdübel mit Prüfmaschine

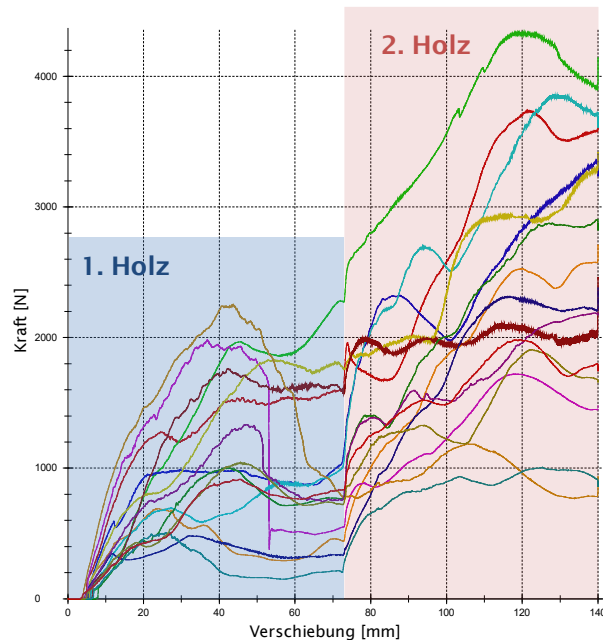


Abb. 15: Einbringkräfte PK 4, Bohrlochdurchmesser 12.0 mm

3.2.4 Zusammenfassung der Quantifizierung der Einbringkräfte

Für die Bewertung des Einbringverhaltens „gut“ wurde eine Grenze von 0.5 kN festgelegt. Bei einteiligen Prüfkörpern ist dies unterschritten, bei mehrteiligen jedoch überschritten.

Für die Verbindungen mit Stabdübeln im Prüfprogramm wird der Vorbohrdurchmesser aufgrund der Einbringkräfte und Bewertung auf $d + 0.1$ mm festgelegt. Dieser Wert wird auch von der begleitenden Arbeitsgruppe aufgrund der Diskussion der Ergebnisse als Praxisempfehlung gegeben. Die Differenz von 0.1 mm kann durch einen angepassten Bohrlochdurchmesser oder durch ein zusätzliches Ziehen der Stabdübel sichergestellt werden. Das Ziehen von Stabdübeln ist ein zusätzlicher Schritt in der Produktion der Verbindungsmittel birgt aber den Vorteil das in Abundanlagen die Bohrtechnik nicht angepasst werden muss, bei einem Wechsel zwischen Nadelholz und Buchenholz.

4 Vorversuche Tragfähigkeit von Stabdübelverbindungen

4.1 Herstellung der Prüfkörper

Die Prüfkörper werden aus den Brettschichtholzträgern, geschnitten und ihre Position innerhalb des BSH-Träger markiert, s. Abb. 17. Die Bohrungen für die Versuchskörper für Stabdübel mit $d = 8$ mm werden bis maximal $n = 3$ mit der Ständerbohrmaschine hergestellt und mit 0.1 mm grösseren Durchmesser vorgebohrt. Die Rand- und Lochabstände entsprechen den Angaben der SIA 265:2012 und werden in den einzelnen Versuchsserien definiert.

Vor dem Bohren wurden die Versuchskörper in Normalklima 20°C und 65 % relative Luftfeuchte gelagert und direkt nach dem Bohren zusammengesetzt und getestet. Die mittlere Rohdichte und die Holzfeuchten der Prüfkörper wurden bestimmt und sind im Anhang angegeben.

In verschiedenen Versuchsserien sind Verstärkungen der Stabdübelverbindungen vorgesehen. Dazu wird der Holzquerschnitt entweder zwischen den Stabdübeln oder am Rand durch eingedrehte Vollgewindeschrauben (ohne vorbohren) verstärkt. Diese werden mit 10 mm Achsabstand zum Stabdübel ($d = 8$ mm) eingebracht und sollen somit ein Aufspalten des Holzes verhindern sowie den Stabdübel abstützen, s. Abb. 17. Die geplanten/durchgeführten Versuchsserien sind fortlaufend nummeriert und in der Bezeichnung des Prüfkörpers neben weiteren Parametern wie folgt erfasst:

BU-StD19-8-0-02

- Prüfkörper - Nr. 2
- Kraftfaserwinkel - 0° parallel zur Faser
- Verbindungsmitteldurchmesser - 8 mm
- Prüfserie - Nr. 19
- Verbindungsmittel - Stabdübel
- Holzart - Buche

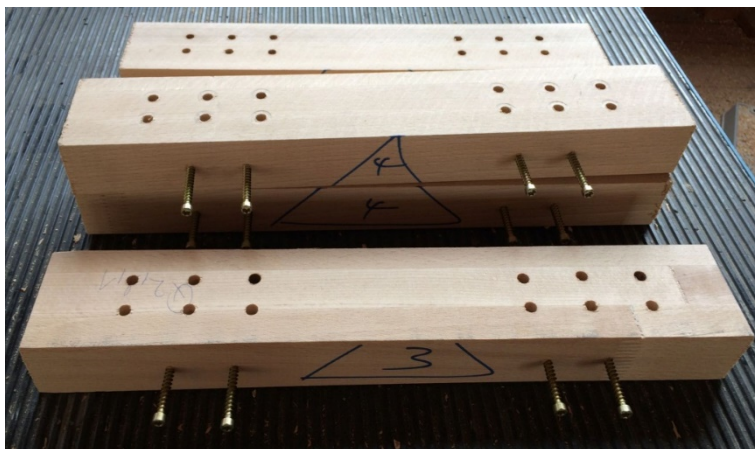


Abb. 17: Verstärkte Stabdübelverbindung

4.2 Getestete Verbindungen

Das Vorversuchsprogramm besteht aus Verbindungen parallel und rechtwinklig zur Faserrichtung. Die Verbindungen werden mit als zweischnittige Verbindungen ausgeführt. Die Grundverbindung ist zweischnittig mit innenliegendem Stahlblech und wird zweireihig mit drei Stabdübeln hintereinanderliegend ausgeführt. Hiervon ausgehend werden die folgenden Parameter variiert:

- Verbindungsmittelabstände, a_1 , a_2 und a_3
- Stabdübeldurchmesser d
- Seitenholzdicke t
- Anzahl der Verbindungsmittelreihen m
- Anzahl der Verbindungsmittelspalten n
- Holzfeuchtegehalt
- Exzentrizität

Die Abbildungen Abb. 18 und Abb. 19 zeigen den prinzipiellen Prüfkörper für die Versuche parallel und senkrecht zur Faser mit Deklaration der verwendeten Abstände und Variablen.

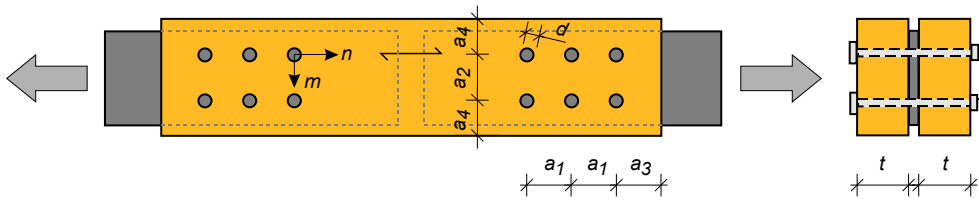


Abb. 18: Prüfkörper für Versuche parallel zur Faser

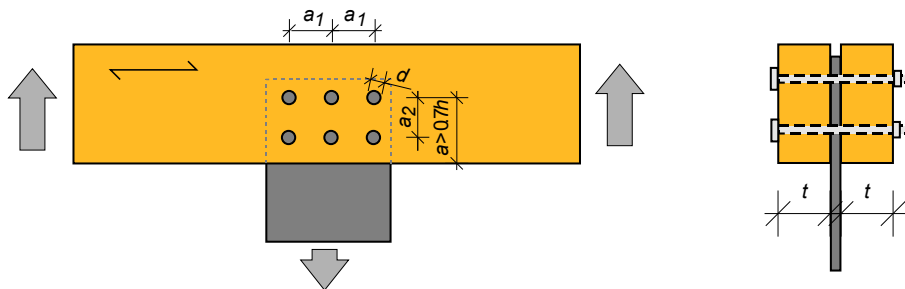


Abb. 19: Prüfkörper für Versuche senkrecht zur Faser

4.3 Versuchsaufbau und Durchführung

Die Krafteinleitung in die Verbindungen erfolgt über die Stahlbleche. Parallel zur Faser werden Zug-Zug-Prüfungen (s. Abb. 20, Abb. 22) durchgeführt. Für Verbindungen senkrecht zur Faser werden Zug-Druck-Prüfungen (s. Abb. 21) durchgeführt, wobei der unbeanspruchte Rand unten liegt und über Druck fixiert ist und die Belastung des beanspruchten Randes durch Zug nach oben erfolgt. Die Versuchskörper werden nach SN EN 26891:1991 stufenweise zunächst kraftgesteuert mit 25 kN/min auf 40 % ihrer Bruchlast belastet, anschliessend auf 10 % entlastet und auf 70 % der Bruchlast erneut mit 25 kN/min belastet. Anschliessend werden die Versuchskörper mit 1 mm/min weggesteuert zum Bruch gefahren, vgl. Abb. 23. Die Belastung erfolgt bis F_{max} oder über 15 mm Verschiebung. Innerhalb des Versuches wurde die Last-Lastpunkt-Verschiebungskurve über vier resp. zwei am Prüfkörper applizierten induktiven Wegaufnehmern parallel zum Maschinenweg erfasst.



Abb. 20: Prüfaufbau von Stabdübelversuch parallel zur Faser in 250 kN Maschine



Abb. 21: Prüfaufbau von Stabdübelversuch senkrecht zur Faser

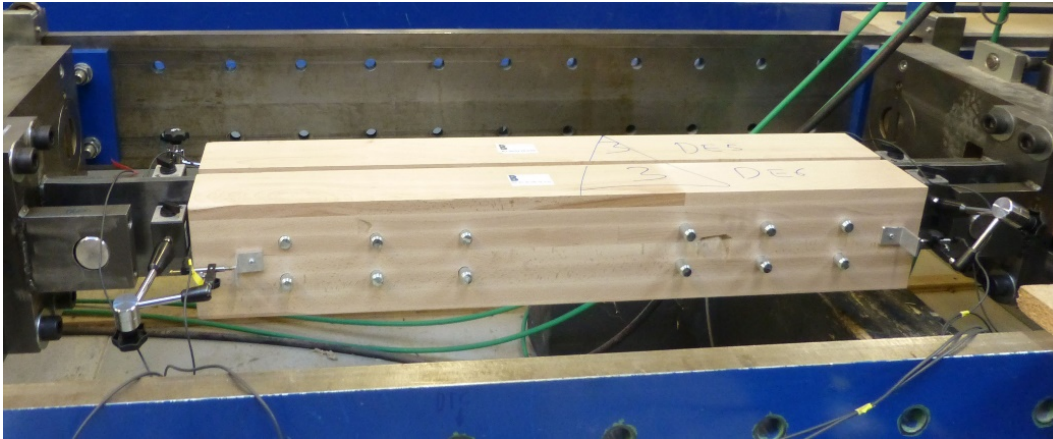


Abb. 22: Prüfaufbau Stabdübelversuch parallel zur Faser in 850 kN Maschine

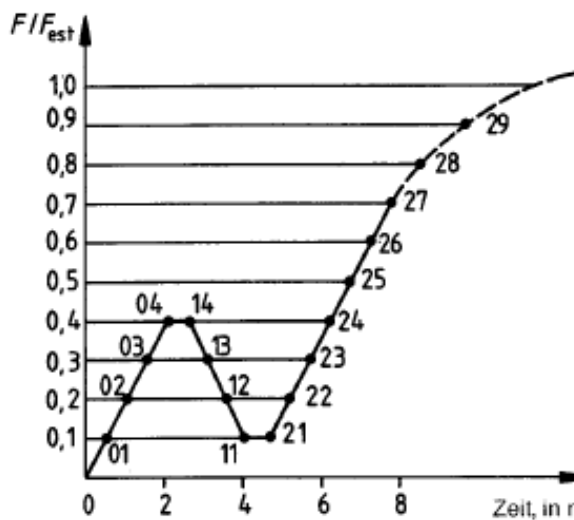


Abb. 23: Belastungsverfahren nach EN 26891:1991

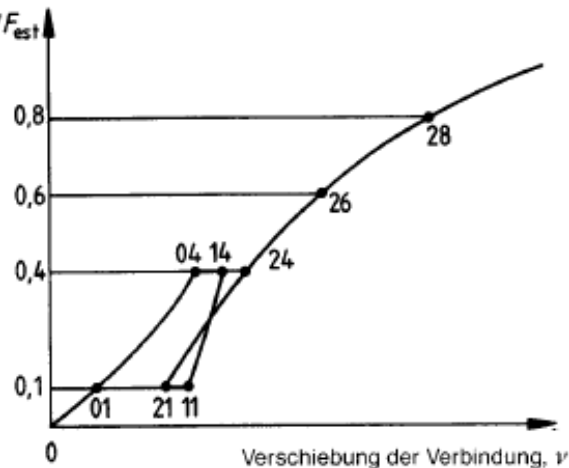


Abb. 24: Auswertungen anhand der Last-Verschiebungskurve nach EN 26891:1991

4.4 Auswertungsschema

Anhand der bei den Versuchen erhaltenen Last-Verschiebungskurven werden die Steifigkeiten sowie die Tragfähigkeit der Verbindungen ermittelt. Das im Folgenden aufgeführte Auswertungsschema zeigt exemplarisch die ausgewerteten Lasten und Steifigkeiten der Verbindungen. Bei der Bestimmung der Last in Abhängigkeit der Verschiebung wird bei den symmetrischen Versuchskörpern von gleichen Verschiebungen in den Verbindungen ausgegangen und die Verschiebungsgrenze somit verdoppelt (vgl. «Last bei 5 mm Verschiebung» und « F_{5mm} » in Abb. 25).

- Last bei 2 mm plastische Verschiebung $F_{2mm,pl.Verf.}$ (offset-method)
- Fließgrenze nach SIA 265:2012, F_y , w_y
- Last bei 5 mm Verschiebung F_{5mm}
- Last bei 15 mm Verschiebung F_{15mm}
- Höchstlast F_{max}
- Bruchlast F_u als 80 % der Höchstlast und Bruch-Verschiebung w_u für Berechnung der Duktilität, nach SIA 265:2012
- Steifigkeiten bei Erst- und Wiederbelastung K_1 und K_2 (Abb. 26 und Abb. 29Abb. 27)

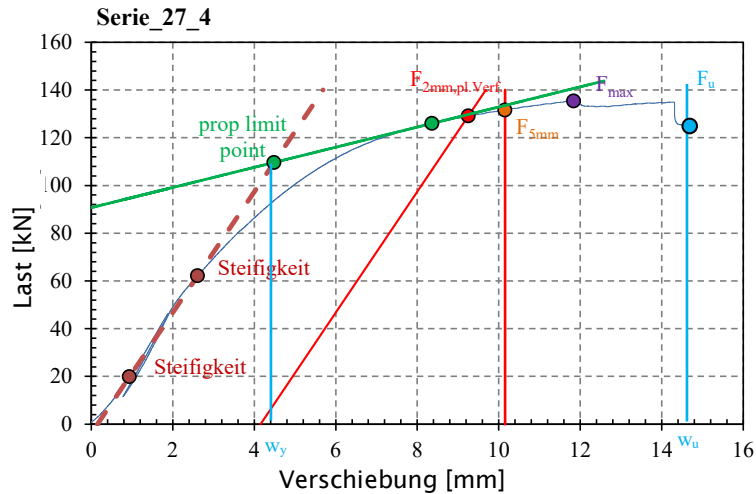


Abb. 25: Auswertungsschema der Tragfähigkeit einer Stabdübelverbindung

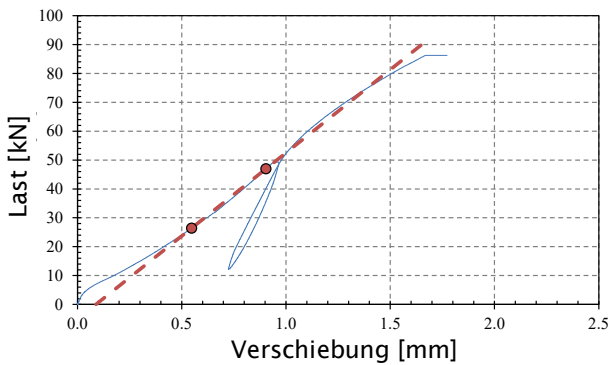


Abb. 26: Auswertungsschema der Steifigkeit bei Erstbelastung, K_1

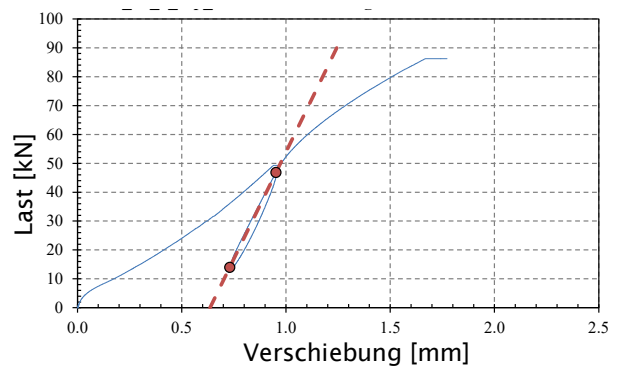


Abb. 27: Auswertungsschema der Steifigkeit bei Wiederbelastung, K_2

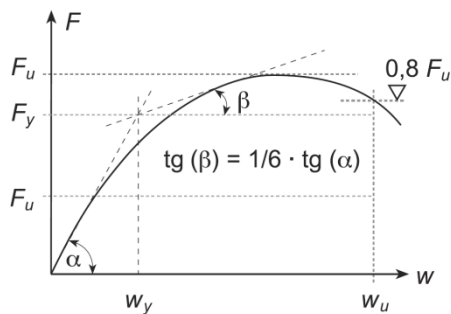


Abb. 28: Definition von Duktilität nach SIA 265:2012

Duktilitätsmass:
$$D_s = \frac{w_u}{w_y} \quad (3)$$

4.5 Versagensmechanismen

4.5.1 Allgemein

Für die Abgrenzung der Versagensfälle wurde die Tragfähigkeit der Verbindung in Abhängigkeit der Verformung und der Seitenholzdicke beurteilt. Der exemplarische Verlauf der Lastkurven mit Kennzeichnung der Versagensarten ist in Abb. 29 bzw. Abb. 30 dargestellt. Generell unterscheidet man zwischen Holzversagen und Versagen des Verbindungsmittels. In den Versuchsserien traten folgende Versagen auf, vgl. Abb. 30:

- Holzversagen
 - Lochleibung bei schmalen Holzdicken
 - Aufspalten entlang der Faser
 - Blockscheren (senkrecht) und Zugbruch (parallel) des Holzes (sehr selten)

- Verbindungsmittel
 - 1 Fließgelenk bei Stabdübeln 20 mm oder dünnen Seitenhölzern
 - 2 Fließgelenke bei Stabdübeln mit Einhaltung der Mindestholzdicken
 - Abscheren der StD in der Scherfuge, teils bei StD 8 mm.

Ein Versagen infolge Blockscheren konnte nicht beobachtet werden. In den folgenden Abschnitten sind die einzelnen Versuchsreihen dargestellt und die jeweiligen Versagensfälle zugeordnet.

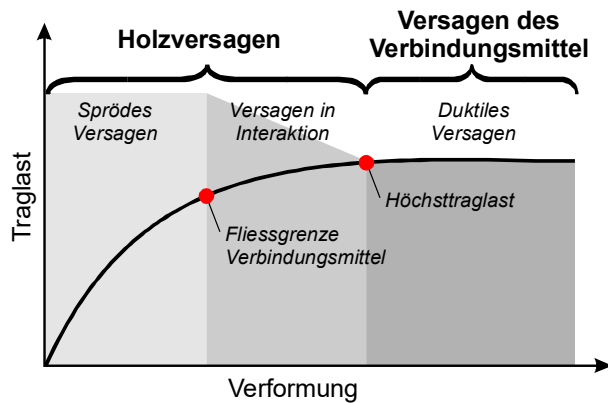


Abb. 29: Trag- und Versagensverhalten von Verbindungen in Abhängigkeit von der Verformung, vgl. Zarnani & Quenneville (2013)

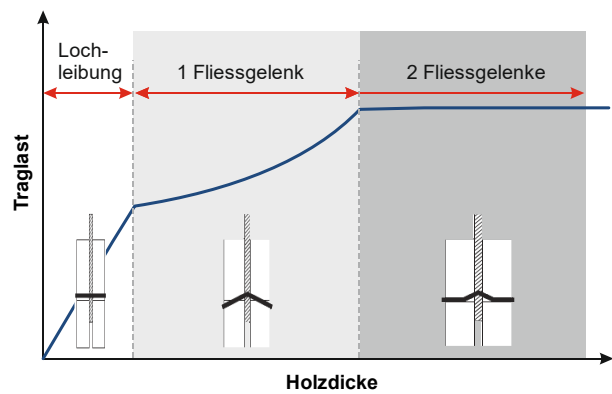


Abb. 30: Tragkraft des Verbindungsmittels in Abhängigkeit der Holzdicke, Angabe der Versagensfälle

4.6 Ergebnisse parallel zur Faserrichtung

4.6.1 Allgemein

Die Versuche werden analog des Auswertungsschemas im Abschnitt 4.4 anhand der maximalen Tragfähigkeit ausgewertet. In den folgenden Grafiken ist jeweils der Mittelwert der maximalen Tragfähigkeit der 5 Versuchskörper angegeben. Die angegebenen Lasten beziehen sich jeweils auf ein Verbindungsmittel unter Berücksichtigung beider Scherflächen und ohne Berücksichtigung einer reduzierten Anzahl der in Lastrichtung hintereinanderliegenden Verbindungsmittel. Detaillierte Angaben zu den erreichten Tragfähigkeiten und Steifigkeiten sind dem Anhang A zu allen Versuchsserien zu entnehmen.

4.6.2 Einfluss Zwischenabstand a_1

Nr.	Endabstand a_3	Zwischenabstand a_1	Zwischenabstand a_2	Randabstand a_4	d [mm]	Anzahl VM	Seitenholzdicke t [mm]	Anzahl
18	$7d$	$9d$	$3d$	$3d$	8	2x3	50	5
19	$7d$	$7d$	$3d$	$3d$	8	2x3	50	5
20	$7d$	$5d$	$3d$	$3d$	8	2x3	50	5
21	$7d$	$5d$ mit Verstärkung	$3d$	$3d$	8	2x3	50	5

Zur Bestimmung des Einflusses des Zwischenabstandes a_1 wurde dieser von $5d$ (mit und ohne Verstärkung) auf $7d$ und $9d$ vergrößert. Die erhaltenen Traglastkurven je Prüfserie sind im Einzelnen wie auch zusammenfassend anhand der gemittelten Traglastkurven in Abb. 32 dargestellt. Die maximalen Tragfähigkeiten belegen, dass eine Erhöhung des Verbindungsmittelabstandes zu höheren Traglasten führt. Durch eine Vergrößerung des Abstandes von $a_1 = 40$ mm ($5d$) auf $a_1 = 56$ mm ($7d$) kann die maximale Tragfähigkeit von $F_{max} = 20.5$ kN auf $F_{max} = 23.7$ kN um 15.6 % gesteigert werden. Eine Erhöhung des Abstandes auf $a_1 = 72$ mm ($9d$) steigert die erreichten Tragfähigkeiten pro Stabdübel auf $F_{max} = 25.2$ kN (23.0 %), wobei die Erhöhung zwischen dem Abstand $a_1 = 7d$ und $9d$ nur noch 6.3 % beträgt.

Betrachtet man die Traglasten unter Einbezug von n_{ef} ergibt sich keine Steigerung der Traglast mit Erhöhung des Abstandes von $a_1 = 7d$ und $9d$. Die Verstärkung liefert hingegen kaum höhere Tragfähigkeiten (siehe Abb. 31). Die Anwendung von Verstärkungen gegen das seitliche

Aufreissen des Holzes führt zu einer Erhöhung der Traglast im Mittel von 5.4 % für einen Verbindungsmittelabstand von $a_1 = 5d$. Das Duktilitätsmass erhöht sich ebenfalls mit steigendem Verbindungsmittelabstand a_1 . Eine deutliche Steigerung kann mit der Erhöhung des Verbindungsmittelabstandes auf $a_1 = 9d$ erzielt werden.

In den Versuchsreihen Nr. 18 – 21 sind im Versagen die Ausbildung von 2 Fließgelenken und in einigen Versuchen das Abscheren der Verbindungsmittel neben dem teilweisen Aufspalten von Holz beobachtet wurden, vgl. (Abb. 34 bis Abb. 36).

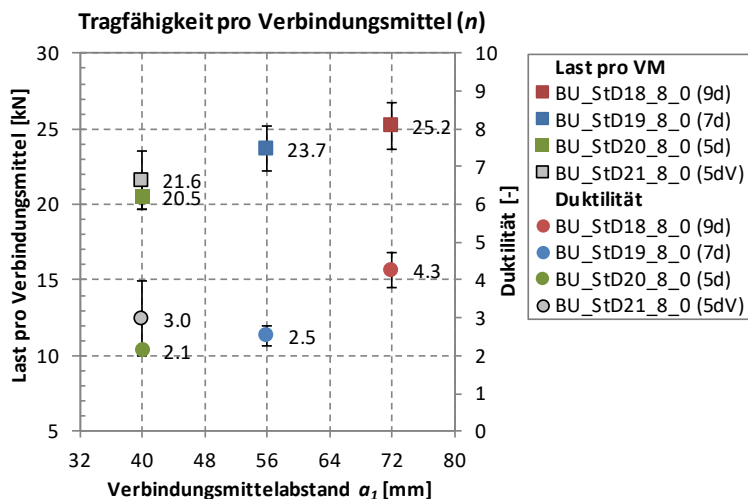


Abb. 31: Tragfähigkeit und Duktilität pro Verbindungsmittel in Abhängigkeit des Verbindungsmittelabstands a_1 unter Angabe der Standardabweichung zum Mittelwert je Prüfserie

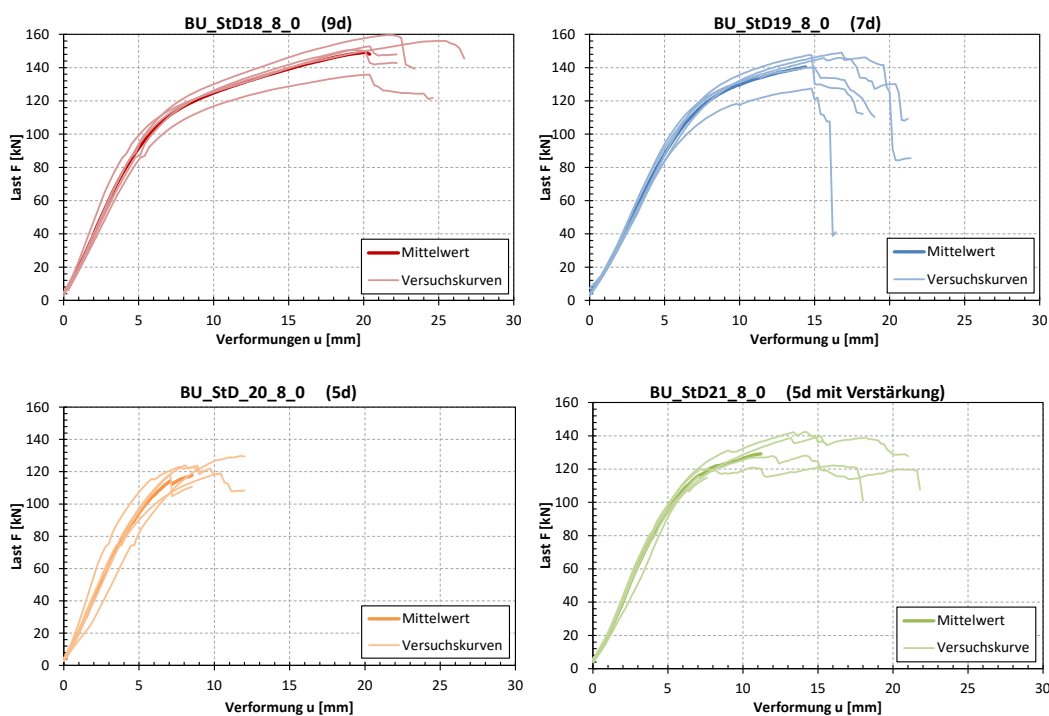


Abb. 32: Einzelne Last-Verschiebungskurven der Versuchsserien

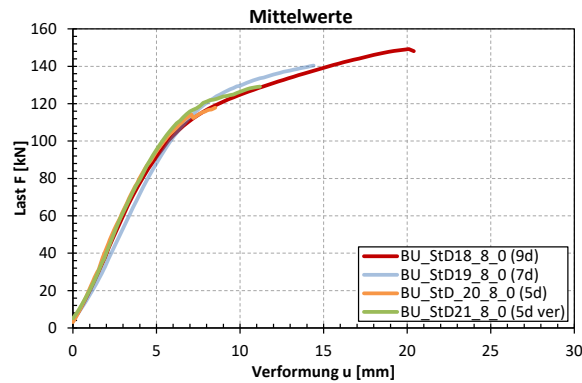


Abb. 33: Gemittelte Last-Verschiebungskurven der Versuchsserien



Abb. 34: Versagensarten BU_StD18_8_0_05: Ausbildung zweier Fließgelenke, Aufspalten des Holzkörpers und Abscheren des Verbindungsmittels



Abb. 35: Versagensarten BU_StD19_8_0_05: Aufspalten des Holzkörpers



Abb. 36: Versagensarten BU_StD21_8_0_05: Ausbildung zweier Fließgelenke, Aufspalten des Holzkörpers und Abscheren des Verbindungsmittels, Ausbrechen des Holzes zwischen den Verbindungsmitteln auf Seiten des Stahlblechs

Zusammenfassung und Schlussfolgerung

- Traglaststeigerung bei Erhöhung der Verbindungsmittelabstände zwischen $5d$ und $9d$
- Geringe Laststeigerung durch Verstärkung mittels Vollgewindeschrauben für $5d$
- Ausbildung zweier Fließgelenke in allen Stabdübeln mit nachfolgendem Versagen durch Abscheren der Verbindungsmittel und/oder Aufspalten des Holzes
- Für verstärkte Verbindungen: Ausbrechen des Holzes zwischen den Verbindungsmitteln, auf den Seiten des Stahlbleches
- Höhere Duktilität für $9d$ Verbindungsmittelabstand
- ➔ $a_{1,min} = 9d$
- ➔ Anwendung von Verstärkungen bei Anforderungen an hohe Duktilität oder zu erwartenden Holzfeuchteänderungen (z. B. zw. Herstellung und Nutzung)

4.6.3 Einfluss Anzahl Verbindungsmittelreihen (m)

Nr.	Endabstand a_3	Zwischenabstand a_1	Zwischenabstand a_2	Randabstand a_4	d [mm]	Anzahl VM	Seitenholzdicke t [mm]	Anzahl
22	$7d$	$7d$	$3d$	$3d$	8	1x3	50	5
19	$7d$	$7d$	$3d$	$3d$	8	2x3	50	5
23	$7d$	$7d$	$3d$	$3d$	8	3x3	50	5

Der Einfluss der Anzahl der Verbindungsmittelreihen m senkrecht zur Belastungsrichtung wird anhand der Versuche 22 und 23 ermittelt. Verglichen werden ein-, zwei- und dreireihige Verbindungen. Der Abstand der Reihen untereinander beträgt $a_2 = 24$ mm ($3d$). Die im Einzelnen in den Prüfserien erreichten Traglastkurven sowie eine Zusammenfassung anhand der gemittelten Kurven ist in Abb. 38 dargelegt. Die getesteten Verbindungen zeigen einen leichten Abfall der mittleren Tragfähigkeiten pro Stabdübel bei mehrreihigen Verbindungen von $F_{max} = 25.1$ kN ($m = 1$) auf $F_{max} = 22.1$ kN ($m = 3$) um 12.0 %, vgl. Abb. 37. Auf dem Niveau der Traglast bei 5 mm Verformung ergeben sich allerdings eher keine Unterschiede. Das Duktilitätsmass verhält sich im gleichen Masse wie die Traglast pro Stabdübel. Für Verbindungen mit mehreren Reihen würde daher ein Verbindungsmittelabstand von $9d$ eine grössere Duktilität zeigen.

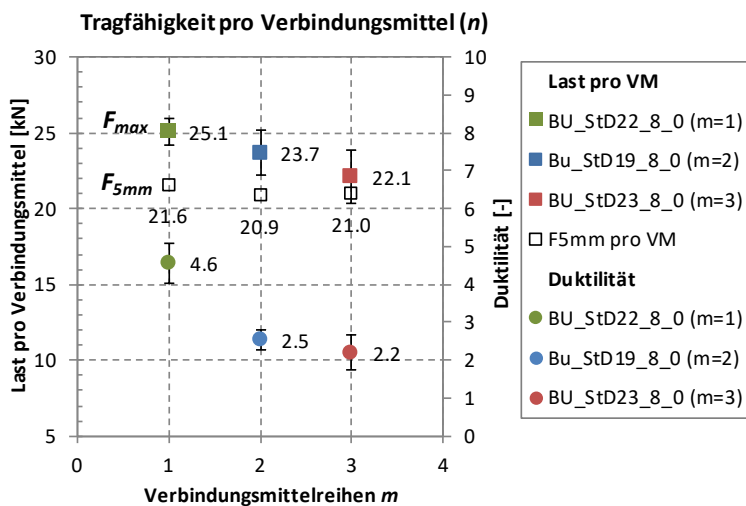


Abb. 37: Tragfähigkeiten und Duktilität pro Verbindungsmittel in Abhängigkeit der Anzahl der Verbindungsmittelreihen m unter Angabe der Standardabweichung zum Mittelwert je Prüfserie

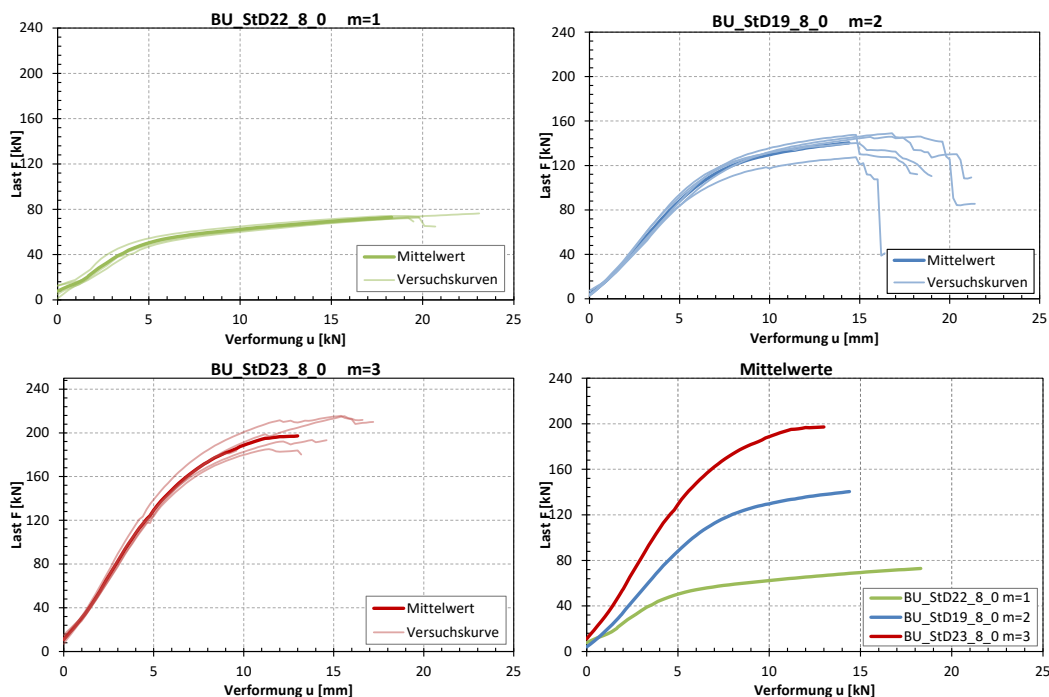


Abb. 38: Einzelne und gemittelte Last-Verformungskurven der Versuchsserien

In den Versuchsreihen Nr. 22 und 23 sind im Versagen die Ausbildung von 2 Fliessgelenken, das Abscheren von Verbindungsmitteln in einigen Versuchen (bei ein- und zweireihigen Verbindungen) und das massgebende Versagen wird überwiegend durch Aufspalten des Holzteils verursacht, vgl. (Abb. 39 bis Abb. 41).



Abb. 39: Versagensarten BU_StD22_8_0_03: Ausbildung zweier Fliessgelenke, Aufspalten des Holzkörpers entlang der Faser



Abb. 40: Versagensarten BU_StD22_8_0_01: Ausbildung zweier Fliessgelenke, Abscheren des Verbindungsmittels



Abb. 41: Versagensarten BU_StD23_8_0_04: Ausbildung zweier Fliessgelenke, Aufspalten des Holzkörpers entlang der Faser

Zusammenfassung und Schlussfolgerung

- Traglastreduktion bei Zunahme der Anzahl der Verbindungsmittelreihen
 - Ausbildung von 2 Fliessgelenken mit nachfolgendem Versagen der Verbindungen durch Abscheren der Verbindungsmittel und Aufspalten des Holzes
 - Bei mehrreihigen Verbindungsmitteln sind die Fliessgelenke weniger ausgeprägt
 - Geringere Duktilität bei mehreren Verbindungsmittelreihen
- ➔ Traglastermittlung mit Verbindungen mit mind. 3 Reihen

4.6.4 Einfluss Zwischenabstand a_2

Nr.	Endabstand a_3	Zwischenabstand a_1	Zwischenabstand a_2	Randabstand a_4	d [mm]	Anzahl VM	Seitenholzdicke t [mm]	Anzahl
24	$7d$	$7d$	$2d$	$3d$	8	2x3	50	5
25=19	$7d$	$7d$	$3d$	$3d$	8	2x3	50	5
26	$7d$	$7d$	$4d$	$3d$	8	2x3	50	5

Die Variation des Verbindungsmittelabstands a_2 senkrecht zur Faser von $2d$, $3d$ und $4d$ wurde anhand einer dreireihigen Verbindung betrachtet. Die Traglastkurven je Prüfserie sowie der Vergleich der gemittelten Traglastkurven ist in Abb. 43 gezeigt. Die erreichten mittleren Traglasten zeigen zwischen $2d$ ($a_2 = 16$ mm) und $3d$ ($a_2 = 24$ mm) eine positive prozentuale Differenz von 16.7 %. Eine anschliessende Vergrösserung des Abstandes auf $4d$ ($a_2 = 32$ mm) steigert die Tragfähigkeit nicht weiter. Das Duktilitätsmass zeigt demgegenüber einen stetigen Anstieg mit Erhöhung des Verbindungsmittelabstandes a_2 .

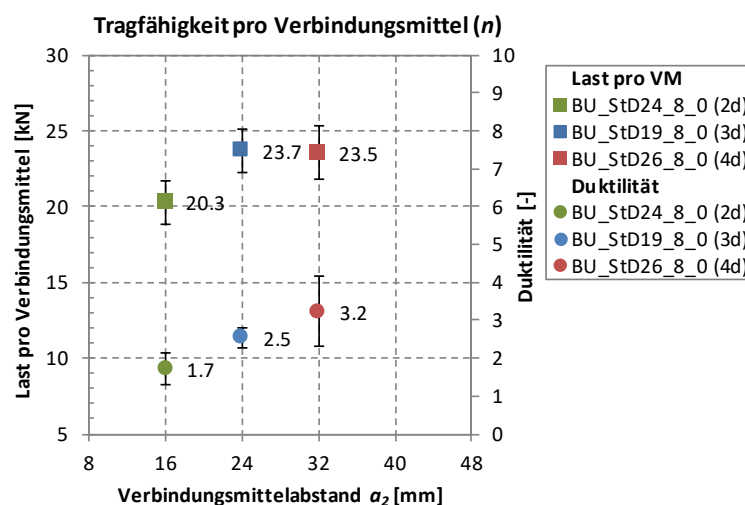


Abb. 42: Tragfähigkeiten und Duktilität pro Verbindungsmittel in Abhängigkeit des Verbindungsmittelabstands senkrecht zur Faser a_2 unter Angabe der Standardabweichung zum Mittelwert je Prüfserie

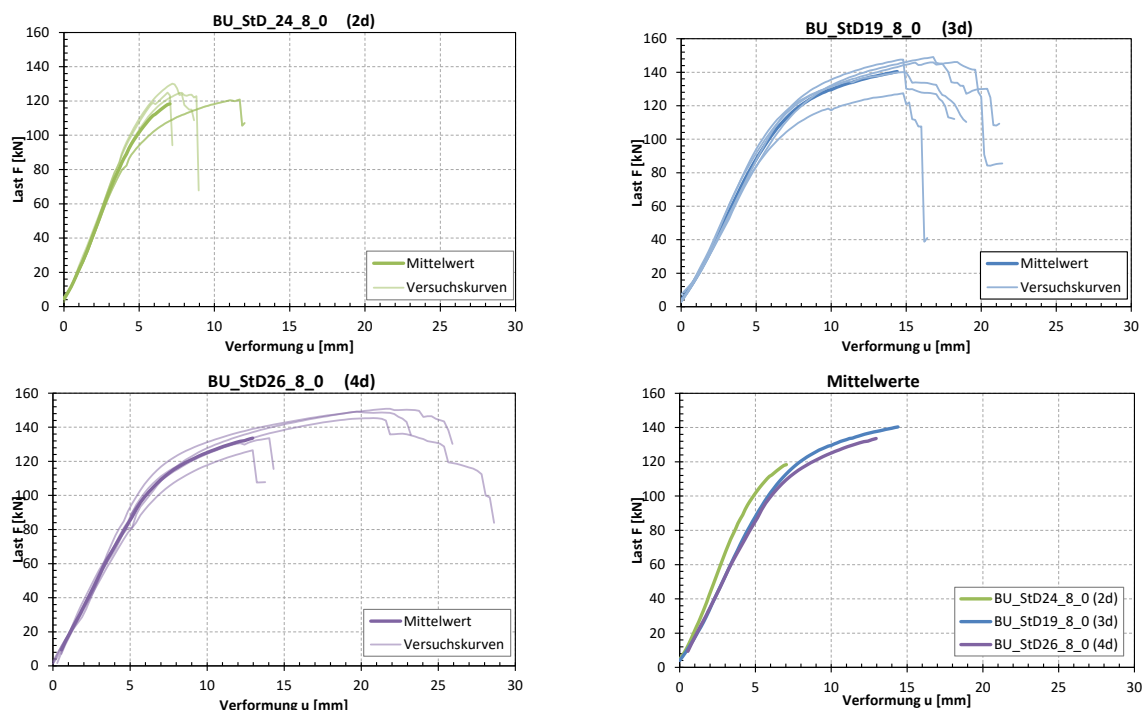


Abb. 43: Einzelne und gemittelte Last-Verschiebungskurven der Versuchsserien

In den Versuchsreihen 24 und 26 zeigte sich im Versagen eine Ausbildung von 2 Fliessgelenken (stärker bei grösseren Abständen) und der Traglastverlust wird bei allen Versuchskörpern durch Aufspalten des Holzteils verursacht, (Abb. 44 und Abb. 45).



Abb. 44: Versagensarten BU_StD24_8_0_02: Ausbildung zweier Fliessgelenke, Aufspalten des Holzkörpers entlang der Faser



Abb. 45: Versagensarten BU_StD26_8_0_02: Ausbildung zweier Fliessgelenke, Aufspalten des Holzkörpers entlang der Faser, Abscheren des Verbindungsmittels

Zusammenfassung und Schlussfolgerung

- Steigerung der Last durch Vergrösserung des Verbindungsmittelabstands a_2 bis $3d$, anschliessend wirkt sich der vergrösserte Abstand nicht mehr aus
- Ausbildung von Fliessgelenken mit nachfolgendem Versagen durch Aufspalten des Holzes
- Bei grösseren Verbindungsmittelabständen senkrecht zur Faser sind die Fliessgelenke stärker ausgeprägt
- Zunahme der Duktilität bei Zunahme der Verbindungsmittelabstände

→ $a_{2,min} = 3d$

4.6.5 Einfluss Endabstand a_3

Nr.	Endabstand a_3	Zwischenabstand a_1	Zwischenabstand a_2	Randabstand a_4	d [mm]	Anzahl VM	Seitenholzdicke t [mm]	Anzahl
27	$9d$	$7d$	$3d$	$3d$	8	2x3	50	5
28=19	$7d$	$7d$	$3d$	$3d$	8	2x3	50	5
29	$5d$	$7d$	$3d$	$3d$	8	2x3	50	5
30	$5d$ mit Verstärkung	$7d$	$3d$	$3d$	8	2x3	50	5

Der Einfluss des Randabstandes a_3 wurde in drei Grössen an 3-reihigen Verbindungen betrachtet. Die Traglastkurven je Prüfserie sowie der Vergleich der gemittelten Kurven ist in Abb. 47 enthalten. Die Vergrösserung des Randabstandes in Kraft-Faserrichtung führt zu keiner Steigerung der Tragfähigkeit. Die Versuchskörper mit dem Randabstand $5d$ ($a_3 = 40$ mm) zeigen gegenüber den Proben mit $7d$ ($a_3 = 56$ mm) etwas tiefere Tragfähigkeiten ($F_{max} = 21.5$ kN für $5d$ zu $F_{max} = 23.7$ kN für $7d$ und $F_{max} = 22.6$ kN für $9d$). Durch die Verstärkung des Randbereichs mittels eingedrehten Vollgewindeschrauben kann bei dem Randabstand $5d$ ($a_3 = 40$ mm) die Tragfähigkeit auf $F_{max} = 24.9$ kN pro Verbindungsmittel gesteigert werden. Die niedrigeren Tragfähigkeiten der Versuche mit Randabstand $9d$ ($a_3 = 72$ mm) gegenüber der Tragfähigkeit mit Randabstand $7d$ lässt sich anhand des Versagens des Versuchs BU_StD27_8_0_03 erklären (vgl. Abb. 46). Bei diesem Versuch tritt ein Zugbruch im Holz parallel zur Faser ein und die Tragfähigkeit liegt mit 20.3 kN deutlich unterhalb der anderen Versuche. Unter Ausschluss dieser Probe erreichen die Serien 27 ($a_3 = 9d$) und Serie 19 ($a_3 = 7d$) praktisch die gleichen mittleren Tragfähigkeiten.

Die Versagensarten in den Versuchen Nr. 27 – 30 gestaltete sich wie folgt (vgl. Abb. 5-31 bis Abb. 50):

- Ausbildung von 2 Fließgelenken, ausser Probe BU_StD27_8_0_03 wegen Zugbruch
- Der Bruch wird bei allen Versuchskörpern durch Aufspalten des Holzteils verursacht
- Es kommt zum Abscheren von Verbindungsmitteln
- Bei verstärkten Verbindungen treten deutlich kleinere Spaltrisse auf
- Zugbruch im Holz in einem Prüfkörper

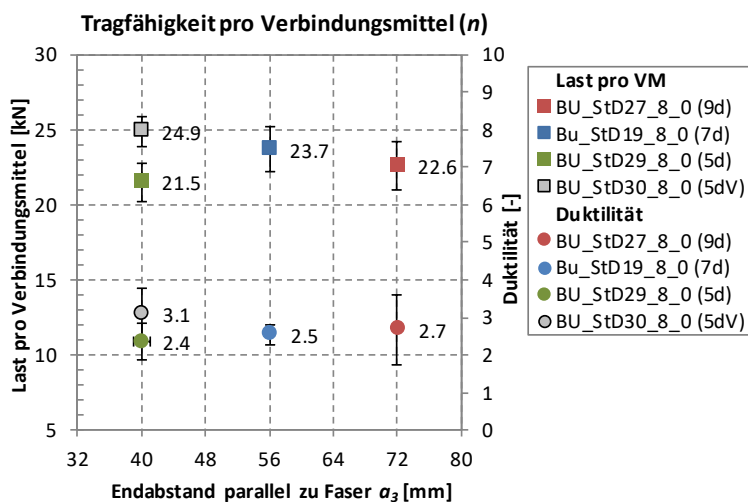


Abb. 46: Tragfähigkeiten und Duktilität pro Verbindungsmittel in Abhängigkeit des Randabstands a_3 unter Angabe der Standardabweichung zum Mittelwert je Prüfserie

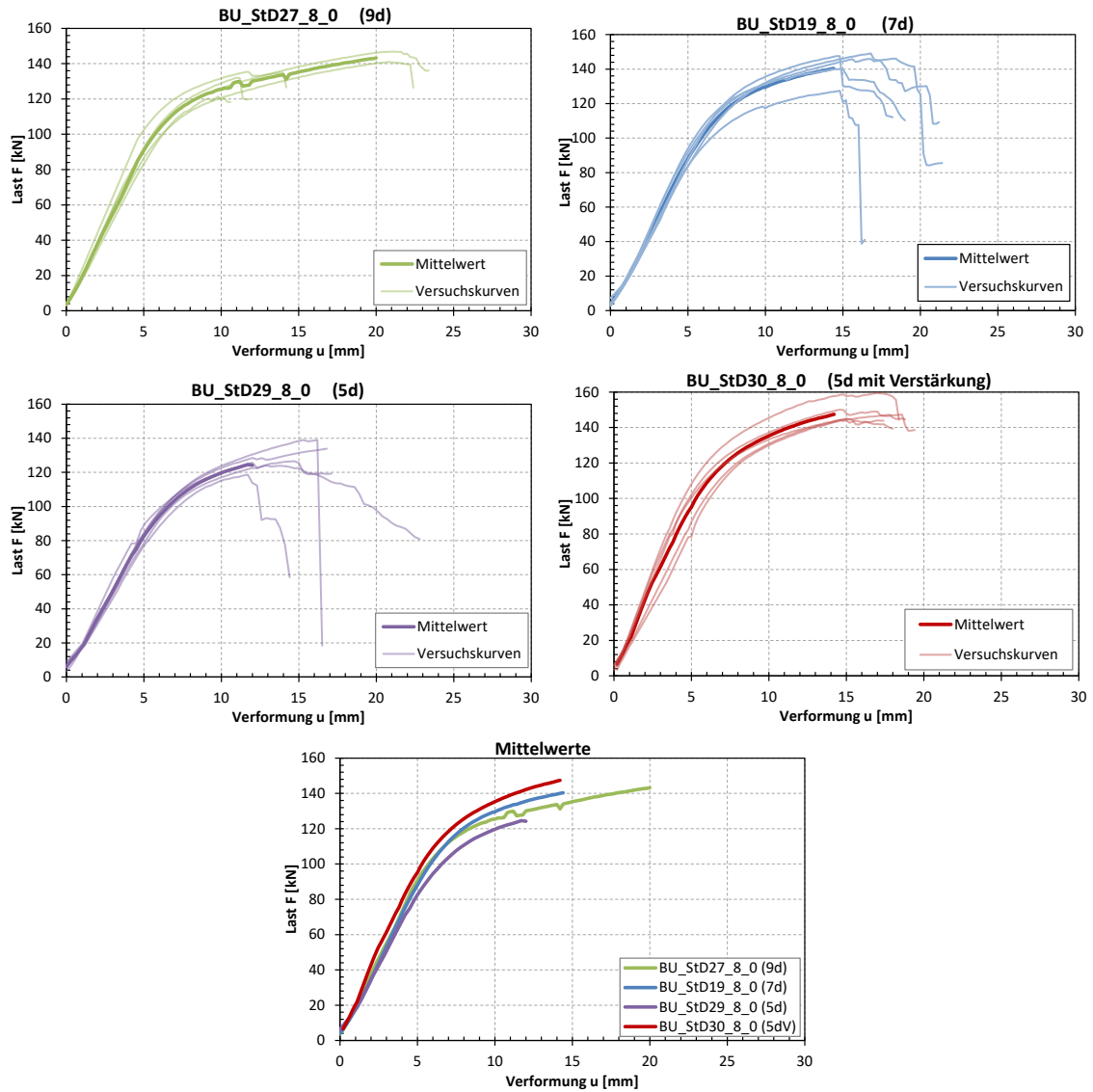


Abb. 47: Einzelne und gemittelte Last-Verchiebungskurven der Versuchsserien



Abb. 48: Aufgetretene Versagensarten BU_StD27_8_0_03: Zugbruch des Holzes



Abb. 49: BU_StD30_8_0_03: Geringe Spaltrisse bei Verbindungen mit verstärkten Rändern (a_3)



Abb. 50: BU_StD29_8_0_03: Stark ausgeprägte Spaltrisse bei unverstärkten Verbindungen mit reduzierten Randabständen ($a_3 = 5d$)

Zusammenfassung und Schlussfolgerung

- Vergrößerung des Randabstandes in Kraft-Faserrichtung wirkt sich ab $7d$ nicht mehr aus
- durch Erhöhung des Randabstandes in Kraft-Faserrichtung kann die erreichte Tragfähigkeit deutlich gesteigert werden
- Ausbildung von Fliessgelenken mit nachfolgendem Versagen der Verbindungen durch Aufspalten des Holzes und Abscheren des Verbindungsmittels
- die verstärkte Verbindung zeigt deutlich geringere Spaltrisse im Holz
- Zugbruch des Holzes in einer Verbindung

→ $a_{3,min} = 9d$; analog a_1 ; mit Verstärkungen gegen Aufspalten $5d$

4.6.6 Einfluss Anzahl Verbindungsmittel n_{ef} für Stabdübelverbindungen

Nr.	Endabstand a_3	Zwischenabstand a_1	Zwischenabstand a_2	Randabstand a_4	d [mm]	Anzahl VM	Seitenholzdicke t [mm]	Anzahl
31	$7d$	-	$3d$	$3d$	8	2x1	50	5
32=19	$7d$	$7d$	$3d$	$3d$	8	2x3	50	5
33	$7d$	$7d$	$3d$	$3d$	8	2x7	50	5
34	$7d$	$9d$	$3d$	$3d$	8	2x2	50	5
35	$7d$	$9d$	$3d$	$3d$	8	2x3	50	5
36	$7d$	$9d$	$3d$	$3d$	8	2x5	50	5
37	$7d$	$9d$	$3d$	$3d$	8	2x7	50	5
38=21	$7d$	$5d$ mit Verstärkung	$3d$	$3d$	8	2x3	50	5
39	$7d$	$5d$ mit Verstärkung	$3d$	$3d$	8	2x5	50	5
40	$7d$	$5d$ mit Verstärkung	$3d$	$3d$	8	2x7	50	5

Das Prüfprogramm beinhaltet 2-reihige Verbindungen mit ansteigender Stabdübelanzahl in Lastrichtung von 1 bis 7 und unterschiedlichen Zwischenabständen a_1 , vgl. Tabelle. Der Versuch 40 wird ausgelassen, da die Verstärkungen bei vorherigen Versuchen nicht den gewünschten Effekt zeigen und die vorhandenen Ergebnisse genügend Aufschluss liefern. Die Traglastkurven der betrachteten Prüfserien sowie der Vergleich der abgeleiteten mittleren Traglastkurven sind in Abb. 52 gezeigt.

Tendenziell tritt mit zunehmender Anzahl von hintereinander angeordneten Verbindungsmitteln ein Abfall der Tragfähigkeit pro Verbindungsmittel auf. Daher kann die Betrachtung von n_{ef} nicht vernachlässigt werden. Ab drei Verbindungsmitteln pro Reihe ergeben sich relativ konstante Traglasten pro Verbindungsmittel, wobei diese für einen Zwischenabstand von $9d$ ca. 5 - 10 % tiefer liegen. Das Duktilitätsmass zeigt einen tendenziell ähnlichen Verlauf wie die Traglasten. Unter Berücksichtigung von n_{ef} ergeben sich konstante Tragfähigkeiten unabhängig der Anzahl der Verbindungsmittel hintereinander.

In den Versuchen 31 – 39 traten folgende Versagensarten ein (vgl. Abb. 54 und Abb. 55):

- Ausbildung von 2 Fliessgelenken, ausgeprägte bei weniger Verbindungsmitteln pro Reihe
- der Bruch wird bei allen Versuchskörpern durch Aufspalten des Holzteils verursacht
- es kommt zum Abscheren von Verbindungsmitteln
- bei verstärkten Verbindungen treten deutlich kleinere Spaltrisse auf

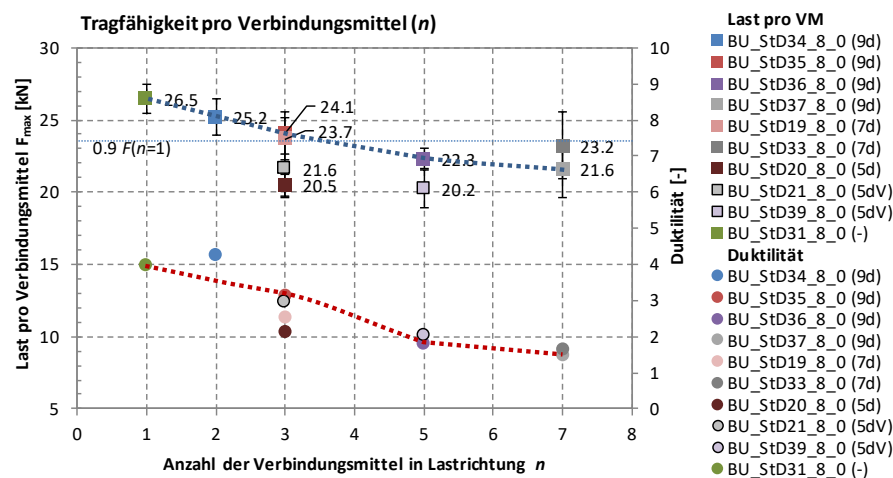


Abb. 51: Tragfähigkeiten und Duktilität pro Verbindungsmittel in Abhängigkeit der Anzahl der Verbindungsmittel hintereinander n unter Angabe der Standardabweichung zum Mittelwert je Prüfserie

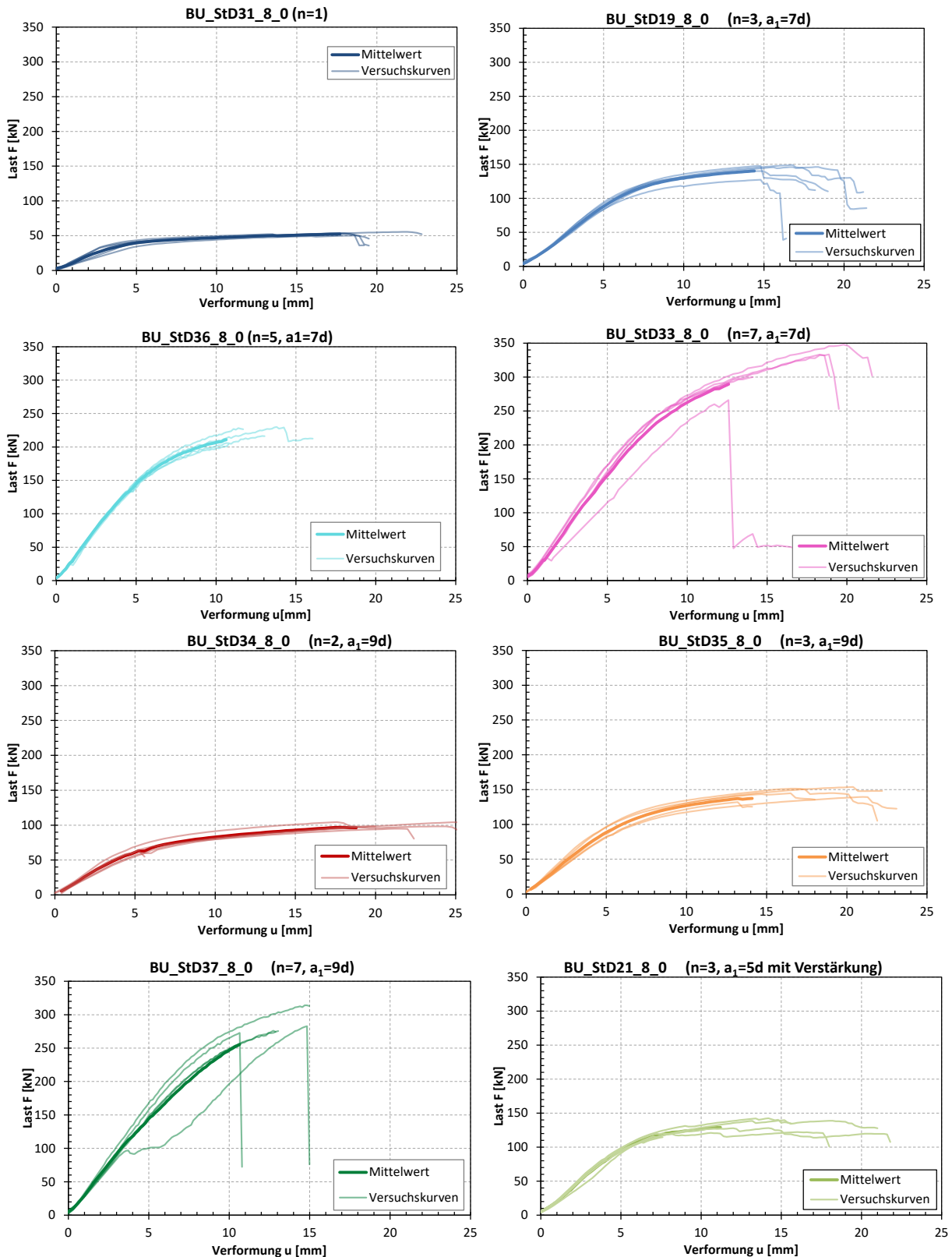


Abb. 52: Einzelne Last-Verschiebungskurven der Versuchsserien

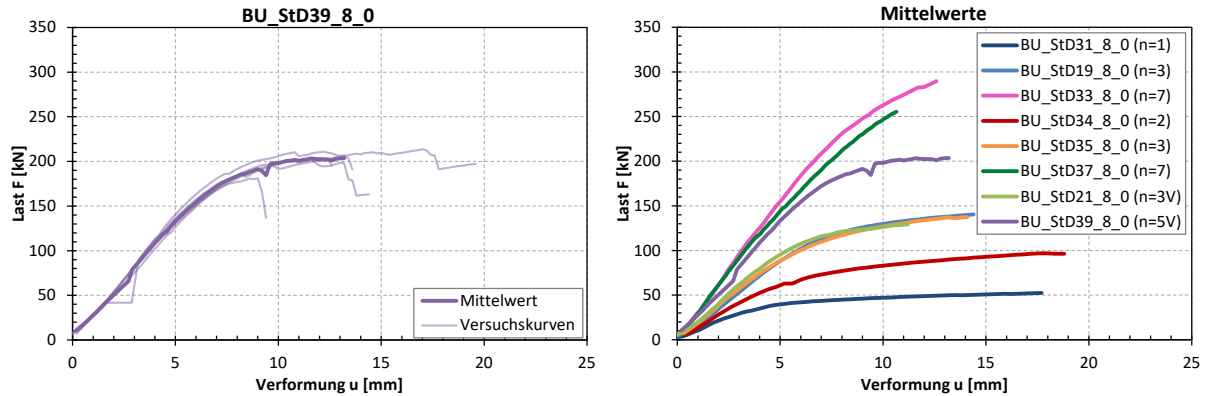


Abb. 53: Einzelne und gemittelte Last-Verschiebungskurven der Versuchsserien



Abb. 54: BU_StD31_8_0_02: Ausbildung zweier Fließgelenke, Abscheren des Verbindungsmittels

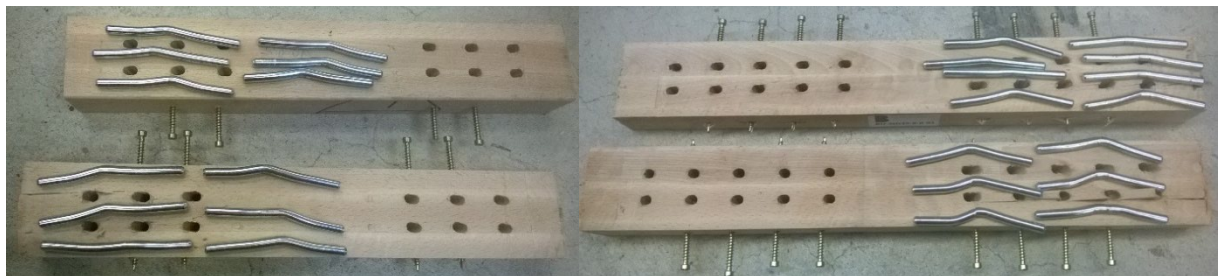


Abb. 55: BU_StD39_8_0_01: Weniger ausgeprägte Spaltrisse bei verstärkten Verbindungen.
Fließgelenke z. T. schwächer ausgeprägt

Zusammenfassung und Schlussfolgerung

- Ausbildung von Fließgelenken mit nachfolgendem Versagen der Verbindungen durch Aufspalten des Holzes und Abscheren des Verbindungsmittels
 - je mehr Verbindungsmittel hintereinander angeordnet sind, desto weniger ausgeprägt sind die Fließgelenke
 - die verstärkte Verbindung zeigt deutlich geringere Spaltrisse im Holz
 - bei Verstärkung: Ausbrechen des Holzes zwischen den Verbindungsmitteln auf Seiten des Stahlblechs
- ➔ Diskussion von Verwendung n_{ef} im Abschnitt 6

4.6.7 Einfluss Holzdicke

Nr.	Endabstand a_3	Zwischen- abstand a_1	Zwischenab- stand a_2	Randab- stand a_4	d [mm]	Anzahl VM	Seitenholz- dicke t [mm]	Anzahl
44	$7d$	$7d$	$3d$	$3d$	8	2x3	$30 (3.75 \cdot d)$	5
45	$7d$	$7d$	$3d$	$3d$	8	2x3	20	5
46=19	$7d$	$7d$	$3d$	$3d$	8	2x3	50	5
47	$7d$	$7d$	$3d$	$3d$	8	2x3	30	5

Da in der Theorie bereits bei Seitenholzdicken von $t = 43$ mm der Versagensfall 3 (Modus 3) nach Johansen auftritt werden die Versuche angepasst, indem die Seitenholzdicken von $t = 30$ mm und $t = 20$ mm getestet werden. Die Tragfähigkeitskurven zeigen sehr geringe Unterschiede für die Testserien mit $t = 20$ mm und $t = 30$ mm, aber deutliche Steigerung der Tragfähigkeiten mit den Versuchen $t = 50$ mm. Zudem bilden die Stabdübel der Versuche mit reduzierten Seitenholzdicken nur ein Fließgelenk aus während bei einer Seitenholzdicke von $t = 50$ mm zwei Fließgelenke ausgebildet werden. Bei Verbindungen mit Stabdübeldurchmessern von $d = 8$ mm liegt die errechnete minimale Seitenholzdicke nach SIA265 bei $t_{l,erf} = 43$ mm. Die durchgeführten Versuche bekräftigen die Annahme des Grenzwerts. Der Grenzwert wird in weiteren Versuchen genauer betrachtet bzw. berücksichtigt. Die Vergleichskurve nach EC5 wurde mit den mittleren Materialparametern aus Abschnitt 2 berechnet.

In den Versuchsserien 45 – 47 traten folgenden Versagen ein (vgl. Abb. 59 bis Abb. 61):

- Ausbildung von 1 Fließgelenk bei $t = 20$ und 30 mm, 2 Fließgelenke bei $t = 50$ mm
- Zugbruch des Seitenholzes bei geringen Seitenholzdicken
- Versagen der Verbindung bei allen Versuchskörpern durch Aufspalten des Holzteils

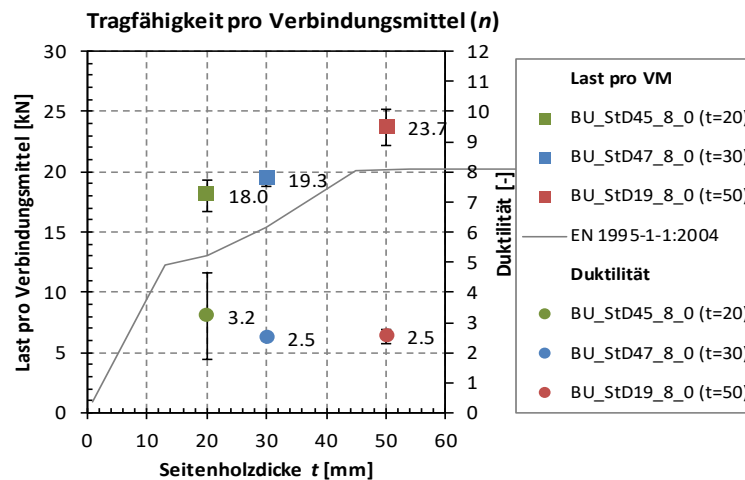


Abb. 56: Tragfähigkeiten und Duktilität pro Verbindungsmittel in Abhängigkeit der Seitenholzdicke t unter Angabe der Standardabweichung zum Mittelwert je Prüferie

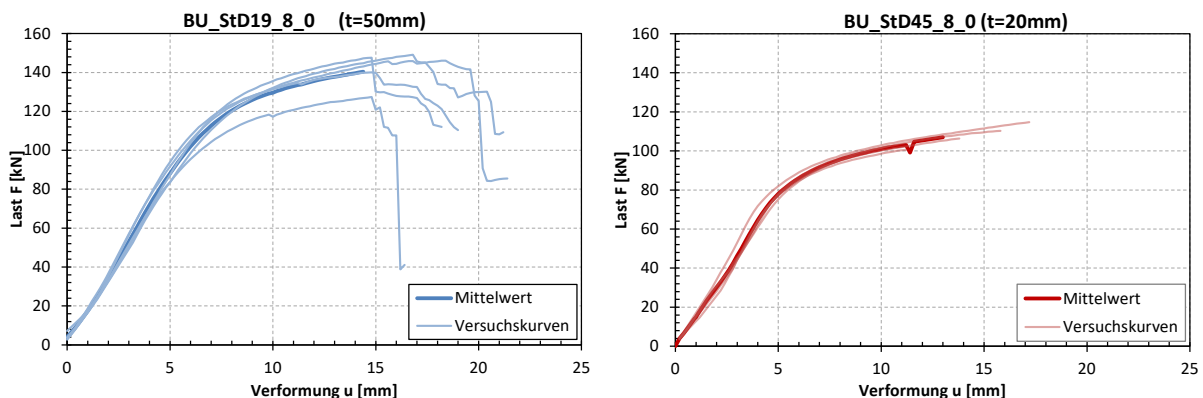


Abb. 57: Einzelne Last-Verschiebungskurven der Versuchsserien

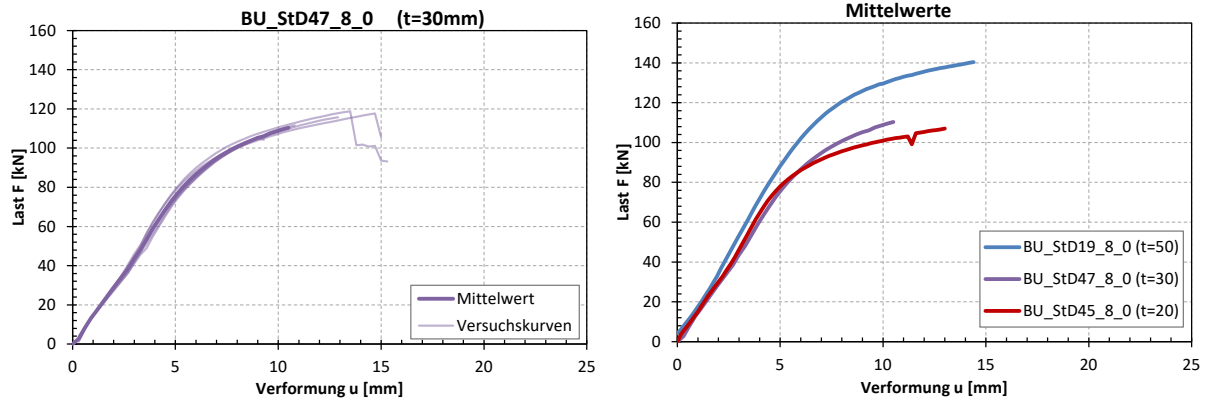


Abb. 58: Einzelne und gemittelte Last-Verschiebungskurven der Versuchsserien



Abb. 59: BU_StD45_8_0_01 ($t = 20 \text{ mm}$): Aufspalten des Holzes, Ausbrechen des Holzes zwischen den Verbindungsmitteln, Zugversagen des Holzes, Ausbildung eines Fließgelenks



Abb. 60: BU_StD47_8_0_02 ($t = 30 \text{ mm}$): Aufspalten des Holzes, Ausbrechen des Holzes zwischen den Verbindungsmitteln, Ausbildung eines Fließgelenks



Abb. 61: BU_StD19_8_0_02 ($t = 50 \text{ mm}$): Ausbildung zweier Fließgelenke

Zusammenfassung und Schlussfolgerung

- Ausbildung von Fließgelenken mit nachfolgendem Versagen der Verbindungen durch Aufspalten des Holzes
- bei geringen Seitenholzdicken tritt ein Zugbruch des Seitenholzes auf
- bei $t = 20 \text{ mm}$ und $t = 30 \text{ mm}$ ergibt sich nur ein Fließgelenk und die Tragfähigkeit der Verbindung ist deutlich geringer
- ➔ Annahme der zu verwendeten Mindestholzdicke von $t_{i,erf} = 43 \text{ mm}$ bekräftigt

4.6.8 Einfluss/Validierung Verbindungsmitteldurchmesser d

Nr.	Endabstand a_3	Zwischenabstand a_1	Zwischenabstand a_2	Randabstand a_4	d [mm]	Anzahl VM	Seitenholzdicke t [mm]	Anzahl
48	$7d$	$7d$	$3d$	$3d$	6	2×2	$40 (6.7 d)$	5
49=19	$7d$	$7d$	$3d$	$3d$	8	2×3	$50 (6.25 d)$	5
50	$7d$	$7d$	$3d$	$3d$	10	2×3	$60 (6 d)$	5
51	$7d$	$7d$	$3d$	$3d$	12	2×1	$70 (5.8 d)$	5
52	$7d$	$7d$	$3d$	$3d$	16	2×3	$80 (5 d)$	5
53	$7d$	$7d$	$3d$	$3d$	20	2×1	$100 (5 d)$	5

Zur Validierung des Einflusses des Verbindungsmitteldurchmessers werden ausschliesslich die Durchmesser 8 mm, 12 mm und 20 mm untersucht. Die Versuchsergebnisse zeigen bei Vergrößerung des Durchmessers einen deutlichen, annähernd linearen Anstieg der Tragfähigkeit. Bei grossen Stabdübeln ($d = 20$ mm) bildet sich lediglich ein schwach ausgebildetes Fließgelenk aus. Die endgültige Versagensart ist in allen getesteten Verbindungen ein Holzversagen. Neben dem Aufspalten entlang der Faser im Bereich der Verbindungsmittel kommt es zudem zu einem Abscheren des Holzes der einzelnen Verbindungsmittelreihen (row shear), vgl. Abb. 65. Stabdübel mit geringem Durchmesser ($d = 8$ mm) bilden hingegen zwei stark ausgebildete Fließgelenke aus.

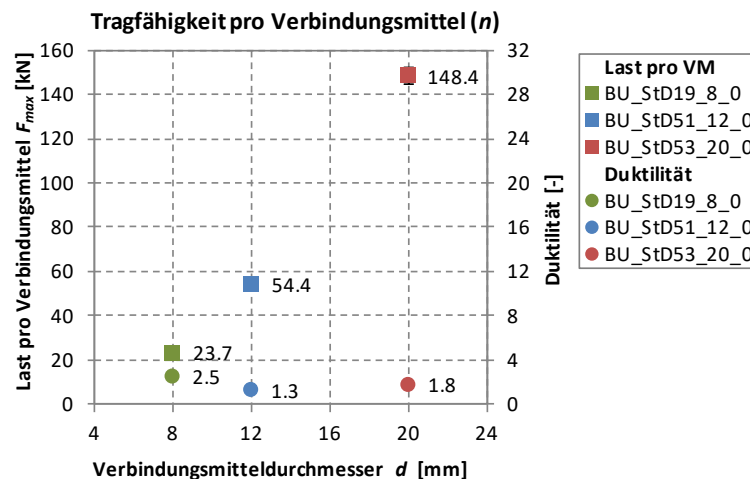


Abb. 62: Tragfähigkeiten und Duktilität pro Verbindungsmittel in Abhängigkeit des Verbindungsmitteldurchmessers d unter Angabe der Standardabweichung zum Mittelwert je Prüfsérie

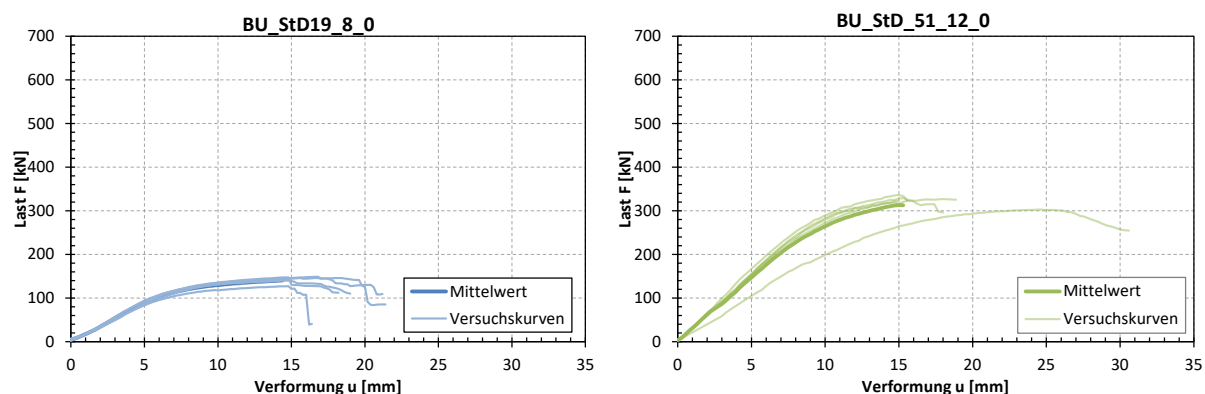


Abb. 63: Einzelne Last-Verschiebungskurven der Versuchsserien

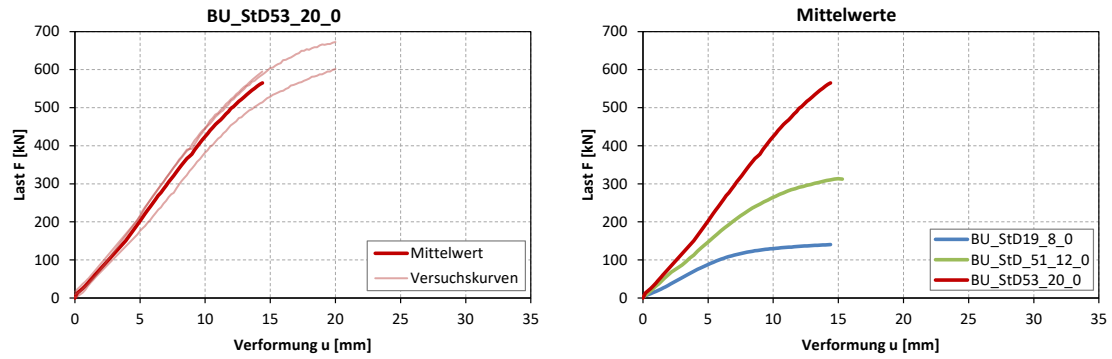


Abb. 64: Einzelne und gemittelte Last-Verschiebungskurven der Versuchsserien



Abb. 65: Versagensbild BU_StD53_20_0: Aufspalten und Abscheren des Holzkörpers. Ausbildung eines schwachen Fliessgelenks

Zusammenfassung und Schlussfolgerung

- unterschiedlich starke Fliessgelenke
- Versagen der Verbindungen durch Aufspalten des Holzes
- Versagen durch Abscheren des Verbindungsmittels
- bei grossen Durchmessern tritt lediglich ein schwach ausgebildetes Fliessgelenk auf
- annähernd linearer Tragfähigkeitsanstieg in Abhängigkeit der Durchmesser

4.7 Ergebnisse rechtwinklig zur Faserrichtung – Verbindungen mit mehreren Stabdübeln

4.7.1 Einführung

Rechtwinklig zur Faser wurden für die Verbindungsmittelgruppen die Verbindungsmittelabstände, Seitenholzdicken und Verbindungsmitteldurchmesser variiert. Dabei wurde jeweils ein hohes Anschlussverhältnis von $a = 0.7h$ verwendet. Die im Weiteren gegebenen Traglasten pro Verbindungsmittel sind mit der Anzahl n berechnet. Die Versuchsdurchführung ist in Abschnitt 4.3 Versuchsaufbau und Durchführung beschrieben.

4.7.2 Einfluss Zwischenabstand a_1

Nr.	Zwischenabstand a_1	Zwischenabstand a_2	d [mm]	Anzahl VM	Seitenholzdicke t	Anzahl Versuche
54	$9d$	$3d$	8	2x3	50	5
55	$7d$	$3d$	8	2x3	50	5
56	$5d$	$3d$	8	2x3	50	5
57	$3d$	$3d$	8	2x3	50	5

Zur Validierung des Einflusses des Verbindungsmittelabstandes parallel zur Faser werden ausschliesslich die Abstände $9d$, $7d$, $5d$ und $3d$ untersucht. Die Auswertung der Tragfähigkeitskurve zeigt, dass die Variation des Abstandes keine signifikante Auswirkung hat, die maximalen Lasten pro Verbindungsmittel bleiben im gleichen Bereich. Alle Versuchskörper zeigen dasselbe Versagen, das Holz beginnt in der Verbindungsmittelreihe mit dem grössten Abstand vom beanspruchten Rand zu versagen respektive aufzureissen (siehe Abb. 68).

Versagensarten in Versuchsreihen 54 – 56 (Abb. 68):

- Ausbildung von eher 1 Fliessgelenk
- das Versagen der Verbindung wird bei allen Versuchskörpern durch Aufspalten des Holzteils in der Reihe mit grösstem Abstand vom beanspruchten Rand hervorgerufen

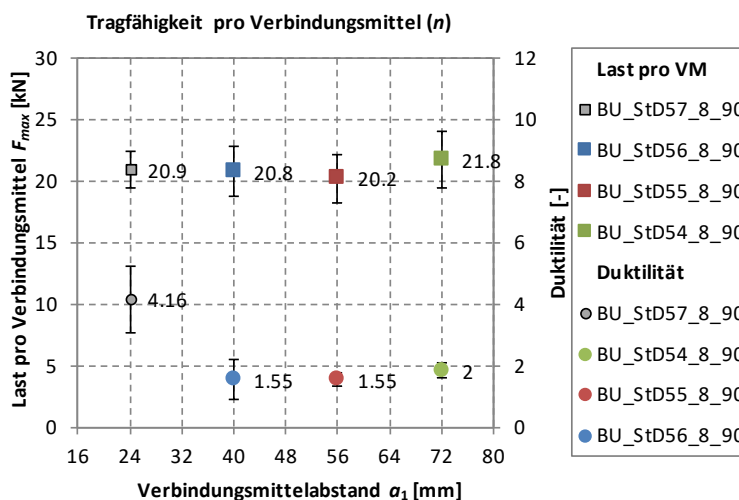


Abb. 66: Tragfähigkeiten und Duktilität senkrecht zur Faser pro Verbindungsmittel in Abhängigkeit des Verbindungsmittelabstands parallel zur Faser a_1 unter Angabe der Standardabweichung zum Mittelwert je Prüfserie

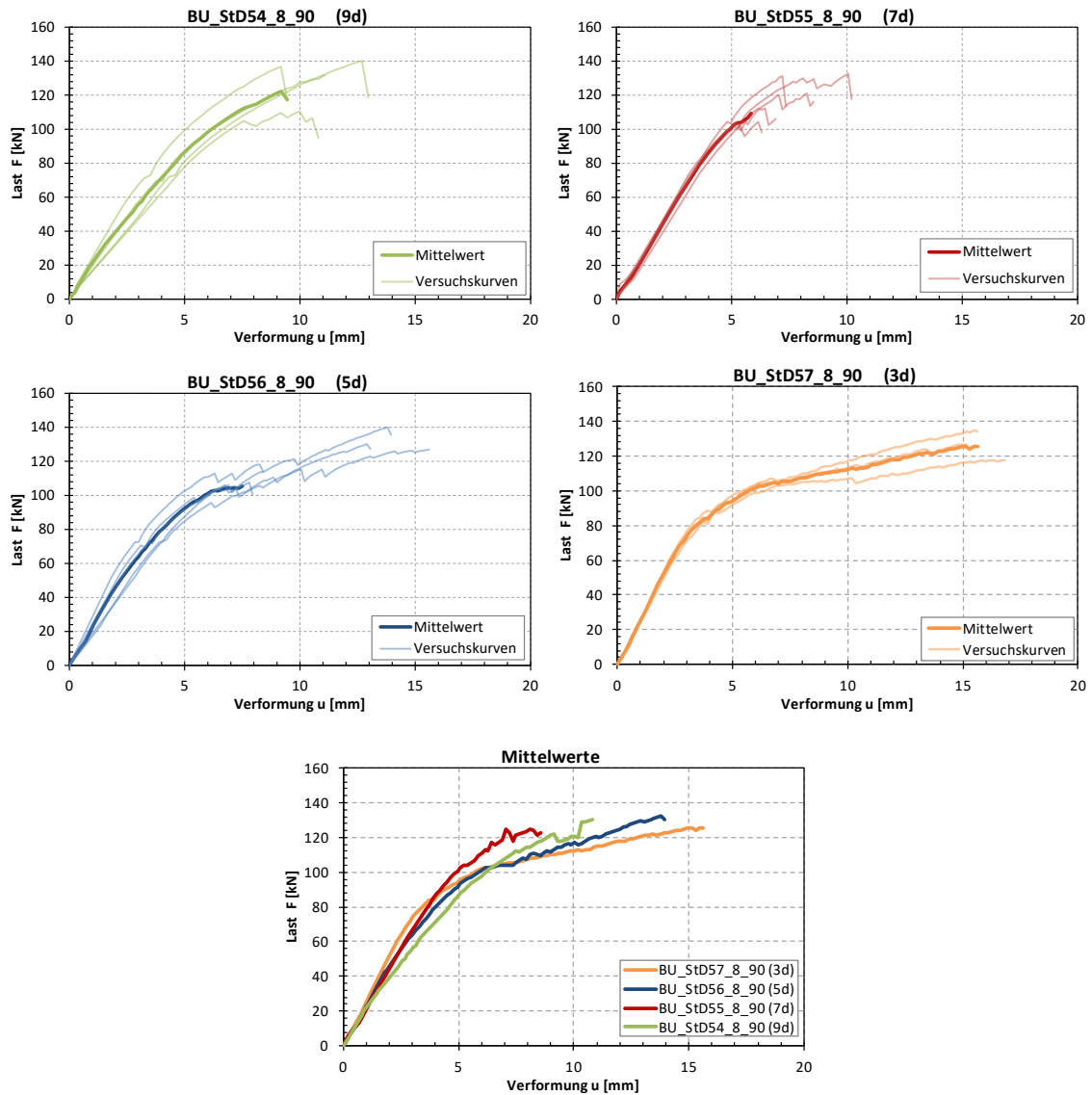


Abb. 67: Einzelne und gemittelte Last-Verschiebungskurven der Versuchsserien



Abb. 68: Versagensbild BU_StD56_8_90_04: Aufspalten in der Reihe mit grösstem Abstand vom beanspruchten Rand. Ausbildung eines, teilweise zweier Fließgelenke

Zusammenfassung und Schlussfolgerung

- Ausbildung hauptsächlich eines Fließgelenks
- Versagen der Verbindungen durch Aufspalten des Holzes an der obersten Verbindungsmittelreihe
- Der Einfluss der Verbindungsmittelabstände in Faserrichtung auf die Tragfähigkeit ist nicht erkennbar

4.7.3 Einfluss Zwischenabstand a_2

Nr.	Zwischenabstand a_1	Zwischenabstand a_2	d	Anzahl VM	Seitenholzdicke t [mm]	Anzahl Versuche
58	$7d$	$2d$	8	2x3	50	5
59=55	$7d$	$3d$	8	2x3	50	5
60	$7d$	$4d$	8	2x3	50	5

Eine Vergrößerung des Verbindungsmittelabstandes senkrecht zur Faser zeigt einen Anstieg der Tragfähigkeit. Von $a_2 = 16$ mm ($2d$) auf $a_2 = 24$ mm ($3d$) steigert sich die Last von $F_{max} = 18.1$ kN auf $F_{max} = 20.2$ kN um 11.5 %. Für $a_2 = 32$ mm kann die Last nochmals auf $F_{max} = 24.1$ kN gesteigert werden (18.9 %). In den Versuchsreihen (56 – 58) treten im Versagen die Ausbildung von eher 1 Fließgelenk auf und das Versagen der Verbindung wird bei allen Versuchskörpern durch Aufspalten des Holzteils an der obersten Verbindungsmittelreihe verursacht, (vgl. Abb. 71).

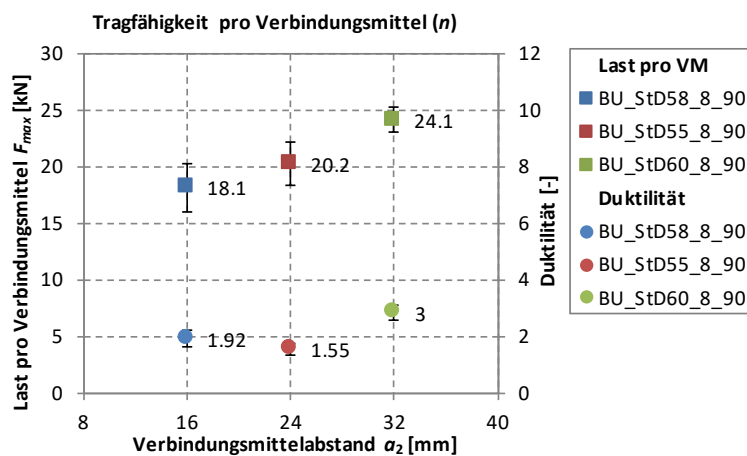


Abb. 69: Tragfähigkeiten und Duktilität senkrecht zur Faser pro Verbindungsmittel in Abhängigkeit des Verbindungsmittelabstands a_2 unter Angabe der Standardabweichung zum Mittelwert je Prüfserie

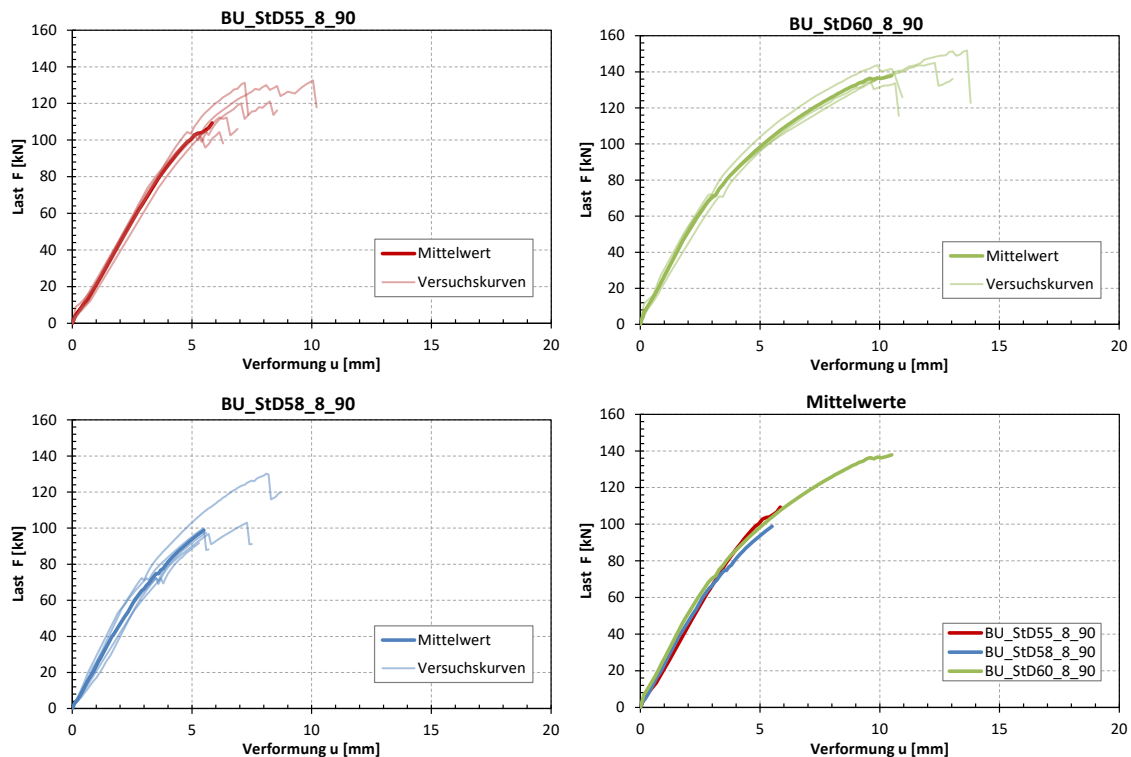


Abb. 70: Einzelne und gemittelte Last-Verschiebungskurven der Versuchsserien



Abb. 71: Versagensbild BU_StD58_8_90_01: Aufspalten des Holzkörpers in der Verbindungsreihe mit grösstem Abstand vom beanspruchten Rand. Ausbildung eines Fliessgelenkes

Zusammenfassung und Schlussfolgerung

- Versagen der Verbindungen durch Aufspalten des Holzes an der obersten Verbindungsmittelreihe
- Ausbildung eines Fliessgelenkes
- Vergrösserung des Abstands steigert die Tragfähigkeit und Duktilität

4.8 Ergebnisse rechtwinklig zur Faserrichtung - ein Verbindungsmittel

4.8.1 Allgemein

Neben den Verbindungsmittelgruppen wurden auch einzelne Verbindungsmitteln mit dem gleichen Versuchsaufbau geprüft. Dabei wurde jeweils ein hohes Anschlussverhältnis von $0.7 h$ verwendet.

4.8.2 Einfluss der Seitenholzdicke t

Nr.	d [mm]	Anzahl VM	Seitenholzdicke t [mm]	Anzahl Versuche
61	8	1	30 (3.75 d)	5
62	8	1	50 (6.75 d)	5
63	8	1	20 (2.50 d)	5

Da die Versuche mit $t = 50$ mm bereits zwei voll ausgeprägte Fliessgelenke aufweisen, wurde die Seitenholzdicke der Versuchsserie 63 auf $t = 20$ mm reduziert. Für die Tragfähigkeiten zwischen den Seitenholzdicken $t = 20$ mm ($F_{max} = 21.3$ kN) und $t = 30$ mm ($F_{max} = 29.4$ kN) ist ein deutlicher Anstieg zu erkennen. Zwischen $t = 30$ mm ($F_{max} = 29.4$ kN) und $t = 50$ mm ($F_{max} = 31.0$ kN) hingegen steigt die Tragfähigkeit kaum an. In den Versuchsreihen 61-63 trat als Versagen die Ausbildung eines Fliessgelenkes und das Abscheren der Verbindungsmittel in den Reihen 61 und 62 auf.

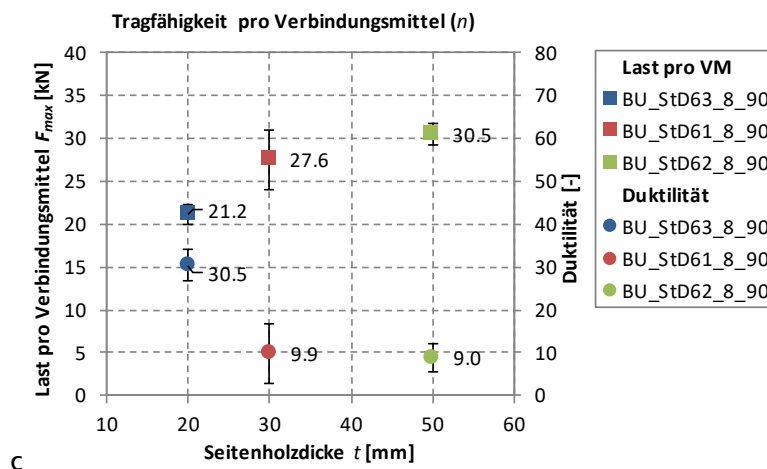


Abb. 72: Tragfähigkeiten und Duktilität senkrecht zur Faser pro Verbindungsmittel in Abhängigkeit der Seitenholzdicke t unter Angabe der Standardabweichung zum Mittelwert je Prüfsreihe

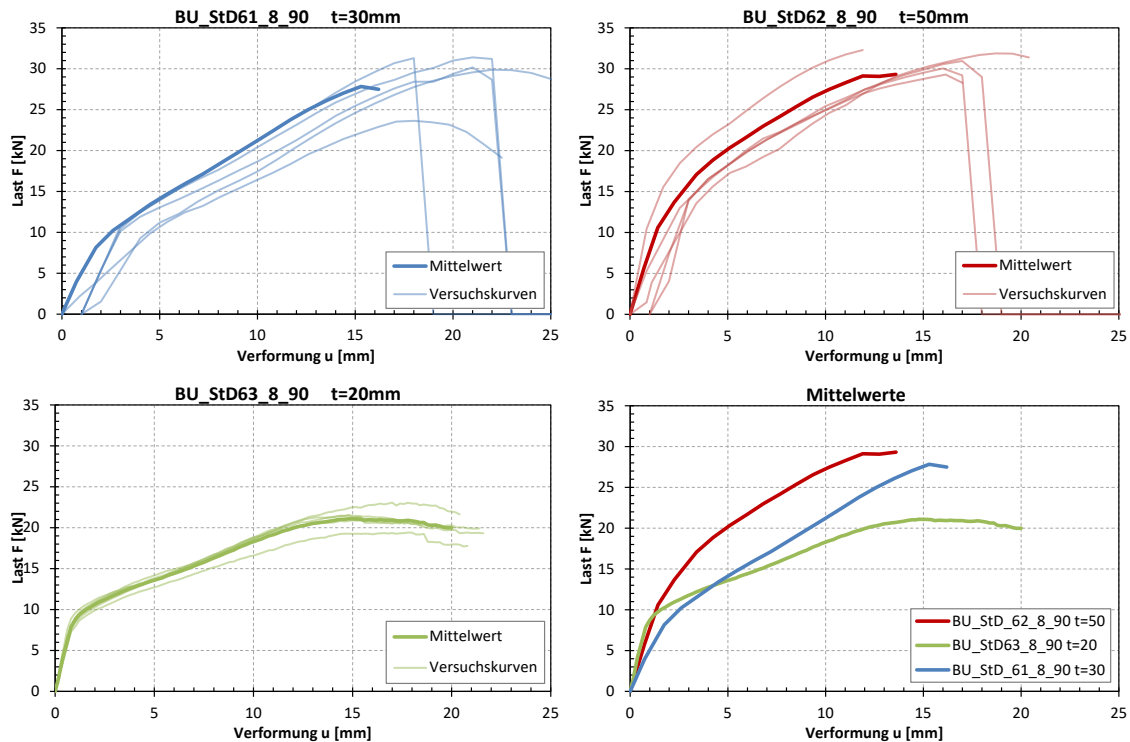


Abb. 73: Einzelne und gemittelte Last-Verschiebungskurven der Versuchsserien

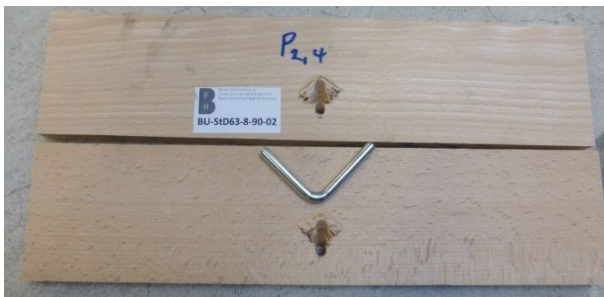


Abb. 74: Versagensbild BU_StD63_8_90_02: Versagen auf Lochleibung, Ausbildung eines Fließgelenks



Abb. 75: Versagensbild BU_StD61_8_90_04: Versagen nach Abscheren des Verbindungsmittels

Zusammenfassung und Schlussfolgerung

- Ausbildung eines Fließgelenks
 - Versagen der Verbindungen durch Biegung (Lochleibung) und Abscheren des Verbindungsmittels
- ➔ $t_{erf} = 30 \text{ mm}$

4.8.3 Einfluss des Stabdübeldurchmessers d

Nr.	d [mm]	Anzahl VM	Seitenholzdicke t [mm]	Anzahl Versuche
64	6	1	40 (6.7 d)	5
(65=62)	8	1	50 (6.25 d)	5
66	10	1	60 (6 d)	5
67	12	1	70 (5.8 d)	5
(68)	16	1	80 (5 d)	5
69	20	1	100 (5 d)	5

Zur Validierung des Einflusses des Stabdübeldurchmessers wurden die Durchmesser $d = 8$ mm, 12 mm und 20 mm untersucht. Die Versuchsergebnisse zeigen bei Vergrößerung des Durchmessers einen weitestgehend linearen Anstieg der Tragfähigkeit. Die Verbindungen versagen auf Ausbildung eines Fließgelenkes und, im Falle mit $d = 8$ mm und $d = 12$ mm, durch teilweises Abscheren des Verbindungsmittels. Je grösser der Durchmesser, desto weniger ausgeprägt ist das Fließgelenk. Bei der Versuchsserie 67 treten zudem Spaltisse im Holz auf (vgl. Abb. 78).

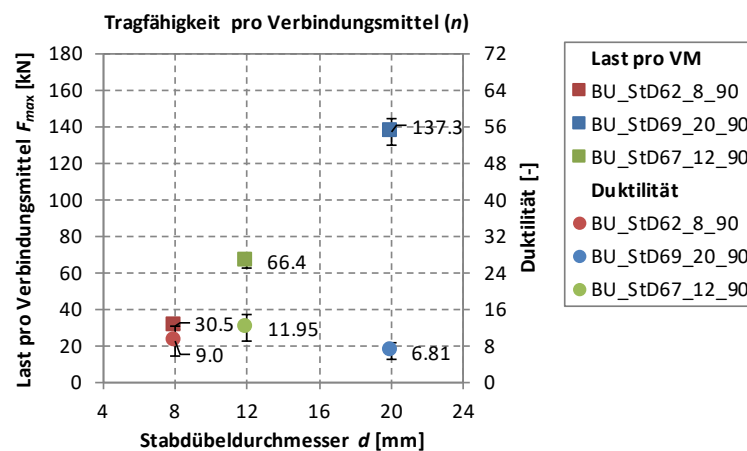


Abb. 76: Tragfähigkeiten und Duktilität senkrecht zur Faser pro Verbindungsmittel in Abhängigkeit des Stabdübeldurchmessers d unter Angabe der Standardabweichung zum Mittelwert je Prüferie

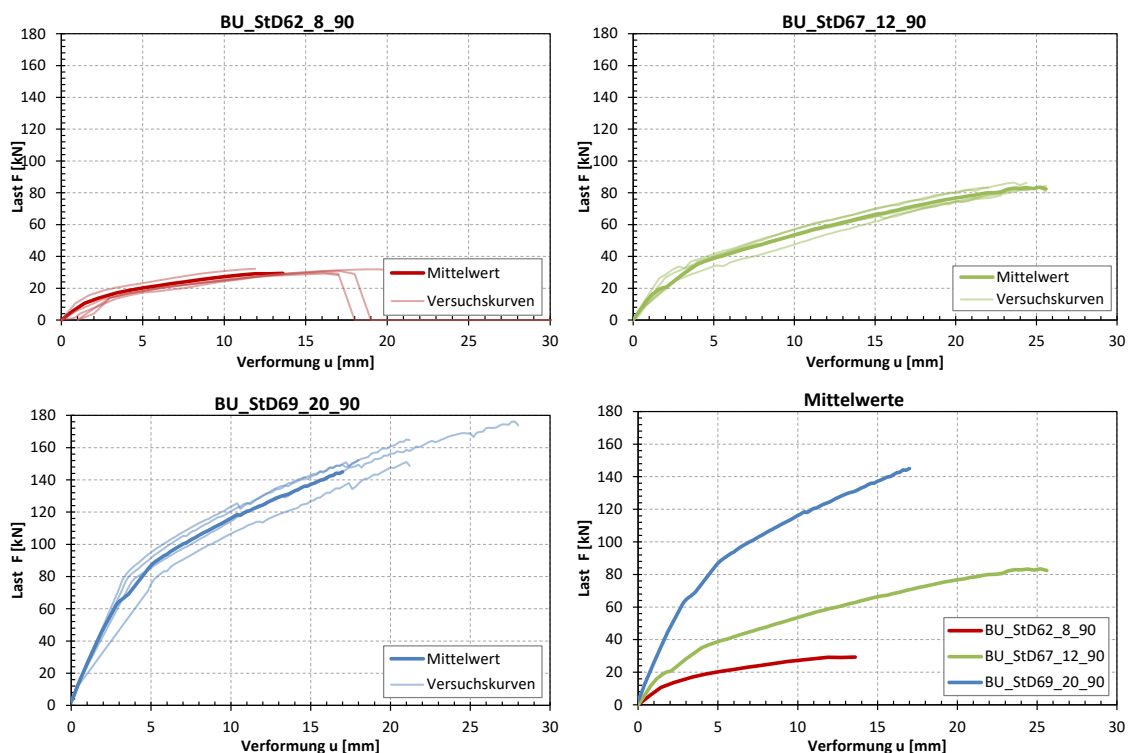


Abb. 77: Einzelne und gemittelte Last-Verschiebungskurven der Versuchsserien



Abb. 78: Versagensbild BU_StD67_12_90_03: Versagen auf Ausbildung eines Fliessgelenks. Auftretende Spaltrisse entlang der Faser



Abb. 79: Versagensbild BU_StD69_20_90_05: Versagen auf Ausbildung eines Fliessgelenks

Zusammenfassung und Schlussfolgerung

- Linearer Anstieg der Tragfähigkeit
- Versagen der Verbindungen durch Ausbildung eines Fliessgelenkes, Abscheren des Verbindungsmittels und Aufspalten
- je grösser der Durchmesser desto weniger ausgeprägt ist das Fliessgelenk

4.9 Verbindungen mit Passbolzen

4.9.1 Ergebnisse parallel zur Faserrichtung - Passbolzen

Das Versuchsprogramm umfasst Serien mit Verbindungen mit Passbolzen und innenliegendem Stahlblech und Serien mit aussenliegenden Stahlblechen. Die Verbindungsmitteldurchmesser war 12 mm und die Verbindungen wurden parallel zur Faserrichtung belastet, siehe Systemskizze in Abb. 80. Die einzelnen Kenngrössen je Versuchsserie sind in Tab. 5 zusammengefasst.

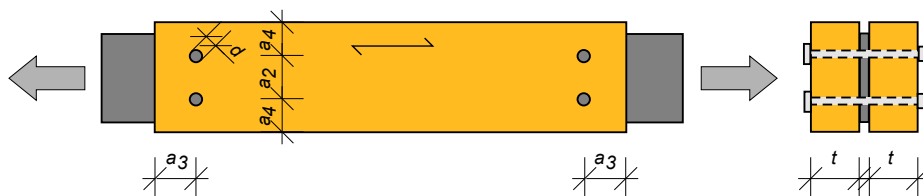


Abb. 80: Versuchsreihen mit Passbolzen parallel zur Faserrichtung und eingeschlitztem Stahlblech

Tab. 5: Versuchsreihen mit Passbolzen parallel zur Faser beansprucht

Name		Endabstand a_3	Zwischenab- stand a_2	Randabstand a_4	d [mm]	Anzahl VM	Seitenholz- dicke t [mm]	Anzahl
B_12_0_IN	II	$7d$	$3d$	$3d$	12	2x1	50	5
B_12_0_OUT	II	$7d$	$3d$	$3d$	12	2x1	50	5

Zur Validierung der Ergebnisse wurden die Lasten mit gleichartigen Stabdübelverbindungen verglichen. Die Tragfähigkeit weist keinen Unterschied zwischen Passbolzen und Stabdübeln auf. Lediglich die Variante mit aussenliegenden Stahlblechen führt zu höheren Traglasten, vgl. Abb. 81. Die Tragfähigkeit wird durch die Lochleibungsfestigkeit und das Fließgelenk bestimmt. Ein Aufreißen des Holzes wurde nicht beobachtet, vgl. (Abb. 84 und Abb. 85).

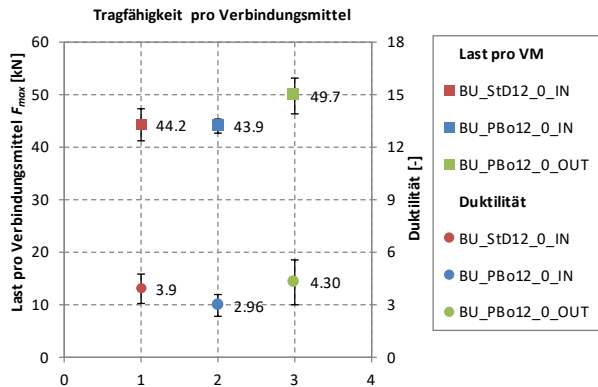


Abb. 81: Versuchsergebnisse für Verbindungen mit Passbolzen parallel zur Faserrichtung unter Angabe der Standardabweichung zum Mittelwert je Prüferie

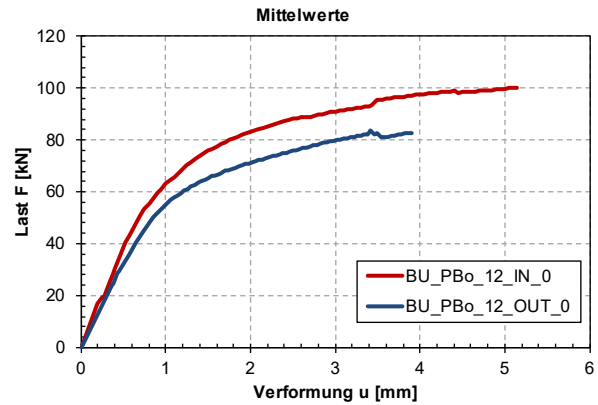


Abb. 82: Vergleich der Mittelwertkurven für innenliegende und aussenliegende Stahlbleche

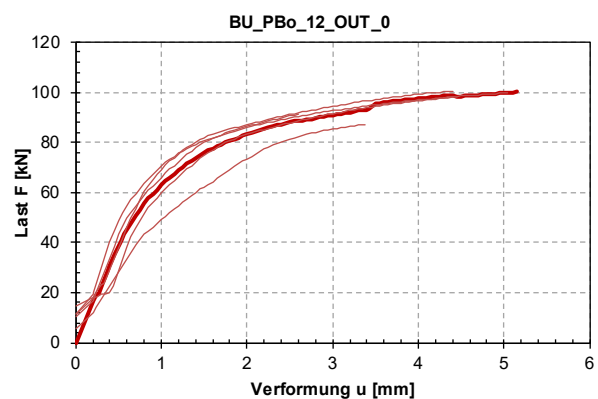
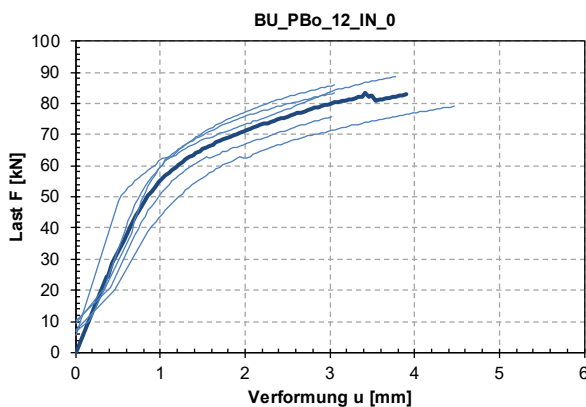


Abb. 83: Traglastkurven der Prüferien für innenliegende und aussenliegende Stahlbleche, parallel zur Faser

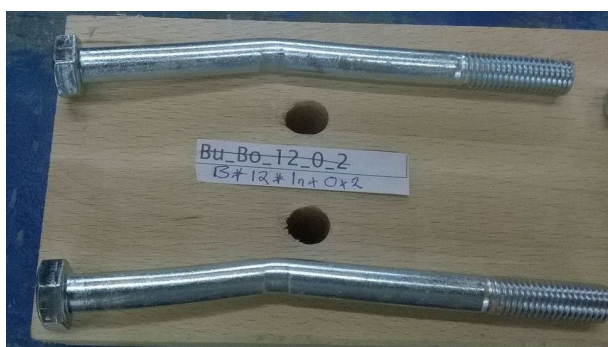


Abb. 84: Verbindung mit Passbolzen und eingeschlitzten Stahlblech, Ausbildung von einem Fließgelenk



Abb. 85: Verbindung mit Passbolzen und aussenliegenden Stahlblechen, Ausbildung von einem Fließgelenk

Zusammenfassung und Schlussfolgerung

- Kein Unterschied in Tragfähigkeiten für innenliegende Stahlbleche zu Stabdübelverbindung
- Traglaststeigerung bei aussenliegenden Stahlblechen für Verbindungen mit Passbolzen
- Versagen der Verbindungen durch Ausbildung eines Fließgelenkes, Lochleibung

4.9.2 Ergebnisse senkrecht zur Faserrichtung - Passbolzen

Das Versuchsprogramm umfasst Serien mit Verbindungen mit Passbolzen und innenliegendem Stahlblech und Serien mit aussenliegenden Stahlblechen. Die Verbindungsmitteldurchmesser war 12 mm und die Verbindungen wurden senkrecht zur Faserrichtung belastet, siehe Systemskizze in Abb. 80. Die einzelnen Kenngrößen je Versuchsserie sind in Tab. 5 zusammengefasst.

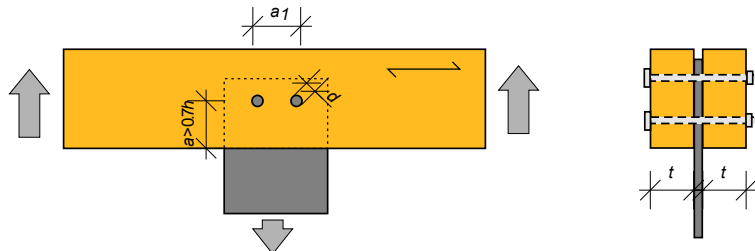


Abb. 86: Versuchsreihen mit Passbolzen senkrecht zur Faserrichtung und geschlitztem Stahlblech

Tab. 6: Versuchsreihen mit Passbolzen senkrecht zur Faser beansprucht

Name		Zwischenab- stand a_1	Rand- abstand a_4	d [mm]	Anzahl VM	Seitenholz- dicke t [mm]	Anzahl
B_12_90_IN	⊥	$5d$	$6d$	12	2x1	50	5
B_12_90_OUT	⊥	$5d$	$6d$	12	2x1	50	5

Zur Validierung der Ergebnisse wurden die Lasten mit gleichartigen Stabdübelverbindungen mit innenliegenden Stahlblechen verglichen. Die Tragfähigkeit kann durch die Verwendung von Passbolzen gegenüber Stabdübeln gesteigert werden. Die Verwendung von aussenliegenden Stahlblechen in den Verbindungen mit Passbolzen führt demgegenüber zu einer Reduzierung der Tragfähigkeit. Die Tragfähigkeit der Passbolzenverbindung wird durch die Ausbildung von Fließgelenken, Erreichen der Lochleibungsfestigkeit und Versagen infolge Querkzug begrenzt.

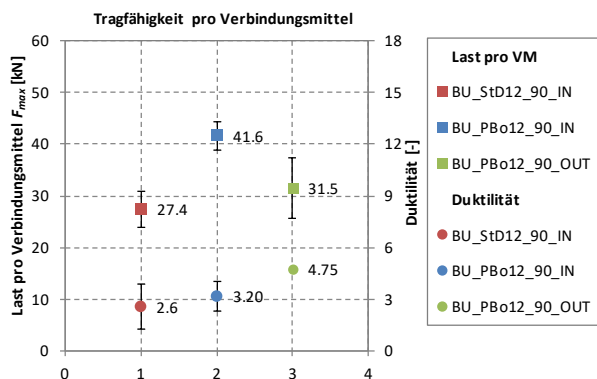


Abb. 87: Versuchsergebnisse für Verbindungen mit Passbolzen parallel zur Faserrichtung unter Angabe der Standardabweichung zum Mittelwert je Prüfserie

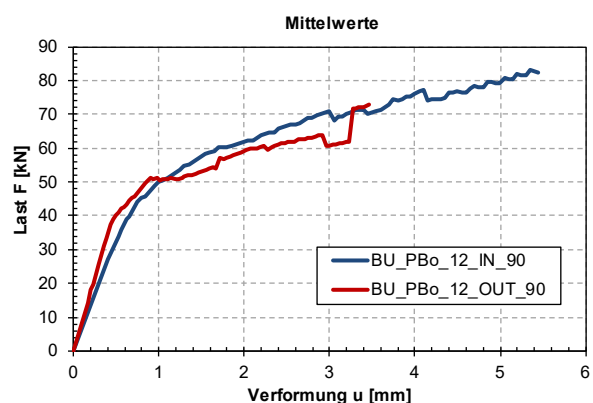


Abb. 88: Versuchsergebnisse für Verbindungen mit Passbolzen parallel zur Faserrichtung

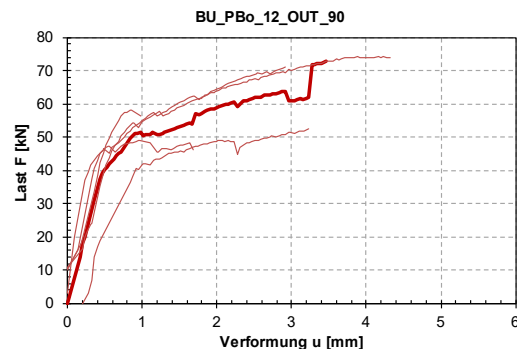
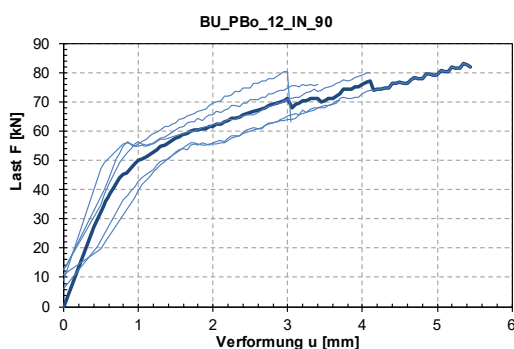


Abb. 89: Traglastkurven der Prüfserien für innenliegende und aussenliegende Stahlbleche, senkrecht zur Faser beansprucht



Abb. 90: Verbindung mit Passbolzen und eingeschlitzten Stahlblech, Ausbildung von einem Fließgelenk



Abb. 91: Verbindung mit Passbolzen und aussenliegenden Stahlblechen, Querkzugversagen

Zusammenfassung und Schlussfolgerung

- Tragfähigkeitsanstieg mit Passbolzen für innenliegende Stahlbleche zu Stabdübelverbindungen
- Traglastreduktion bei aussenliegenden Stahlblechen für Verbindungen mit Passbolzen
- Versagen der Verbindungen durch Querkzug unter gleichzeitiger Ausbildung eines Fließgelenkes, Lochleibung

5 Hauptversuchsserien

5.1 Einführend

Die Hauptversuchsserien sind aufbauend auf den Ergebnissen der Vorversuchsreihen geplant und durchgeführt wurden. Das Versuchsprogramm unterlag ebenfalls einem dynamischen Prozess, da, in Abstimmung der schrittweisen erreichten Ergebnisse oder beobachteten Versagensmechanismen, das Versuchsprogramm angepasst wurde.

5.2 Parallel zur Faserrichtung

5.2.1 Bestimmung der optimalen Mittelholzdicke

Die im Folgenden dargelegten Inhalte sind im Rahmen der Masterarbeit von Julia Katharina Möller (2017) an der ETH Zürich entstanden. Die Durchführung und Auswertung der Versuchsserien erfolgt an der ETH-Zürich durch die Masterstudierende in Betreuung durch Dr. Robert Jocker und Prof. Dr. Andrea Frangi.

Die Versuchsserie umfassen Stabdübelverbindungen mit dicken aussenliegenden Stahlblechen zur Bewertung der Mittelholzdicke unter Zugbeanspruchung parallel zur Faser, vgl. Abb. 92. Die Prüfkörper sind aus vorsortierten Vollholzlamellen aus Buche zum Ausschluss von grösseren Ästen, Rissen und anderen Defekten geschnitten. Die Prüfkörper wurden nach der Rohdichte sortiert und in drei Gruppen mit mittlere Rohdichte $\rho = 700 \pm 20 \text{ kg/m}^3$, hohe Rohdichte $\rho = 790 \pm 20 \text{ kg/m}^3$ und niedrige Rohdichte $\rho = 645 \pm 20 \text{ kg/m}^3$ unterteilt.

Das Versagen der Versuchsreihen beschreibt je nach Mittelholzdicke den Modus 1 – überschreiten der Lochleibungsfestigkeit oder Modus 3 – ausbilden der zwei Fließgelenke nach der Johansen Theorie, wie in Abb. 93 gezeigt.

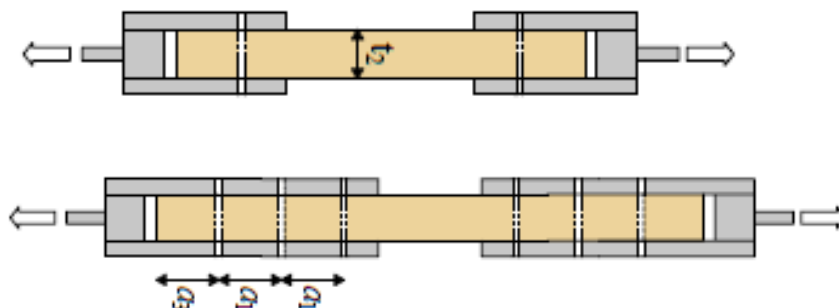


Abb. 92: Prinzipskizze zum Prüfkörperaufbau - Mittelholzdicke, Möller (2017)

Tab. 7 Prüfprogramm, Mittelholzdicke, parallel zur Faser

Nr.	Anzahl VM $m \times n$	d [mm]	t [mm]	Verbindungsmittelabstände				Anzahl	b/h [mm]
				a_1	a_2	a_3	a_4		
100	1x1	8	30	-	-	$10d$	$3d$	4	30/49
101	1x1	8	40	-	-	$10d$	$3d$	7	40/49
102	1x1	8	45	-	-	$10d$	$3d$	2	45/49
103	1x1	8	50	-	-	$10d$	$3d$	4	50/49
104	1x1	8	55	-	-	$10d$	$3d$	2	55/49
105	1x1	8	60	-	-	$10d$	$3d$	8	60/49
106	1x1	8	70	-	-	$10d$	$3d$	4	70/49
107	1x3	8	60	$6d$	-	$10d$	$3d$	3	60/49
108	1x3	8	60	$8d$	-	$10d$	$3d$	4	60/49
109	1x3	8	60	$10d$	-	$10d$	$3d$	4	60/49

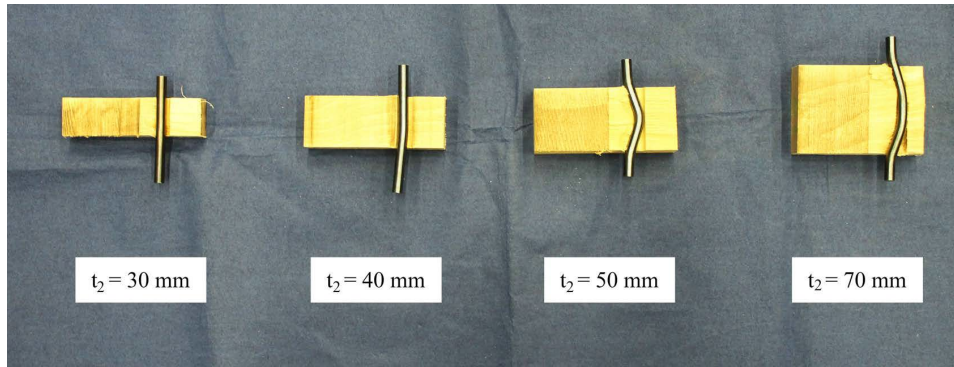


Abb. 93: Getestete und aufgesplante Prüfkörper zur Versuchsserie Mittelholzdicke, Möller (2017)

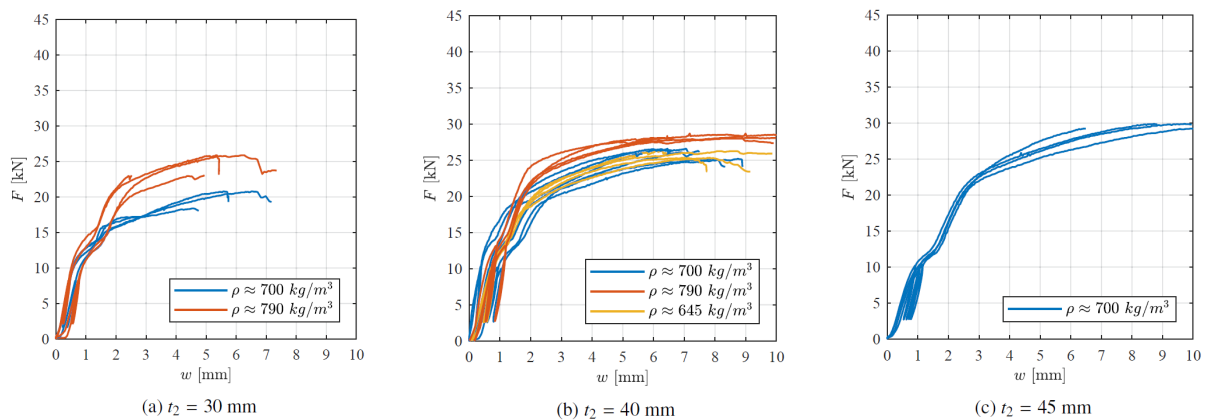


Abb. 94: Traglastkurven der Versuchsserien mit kleineren Mittelholzdicken und der Rohdichteklasse, Möller (2017)

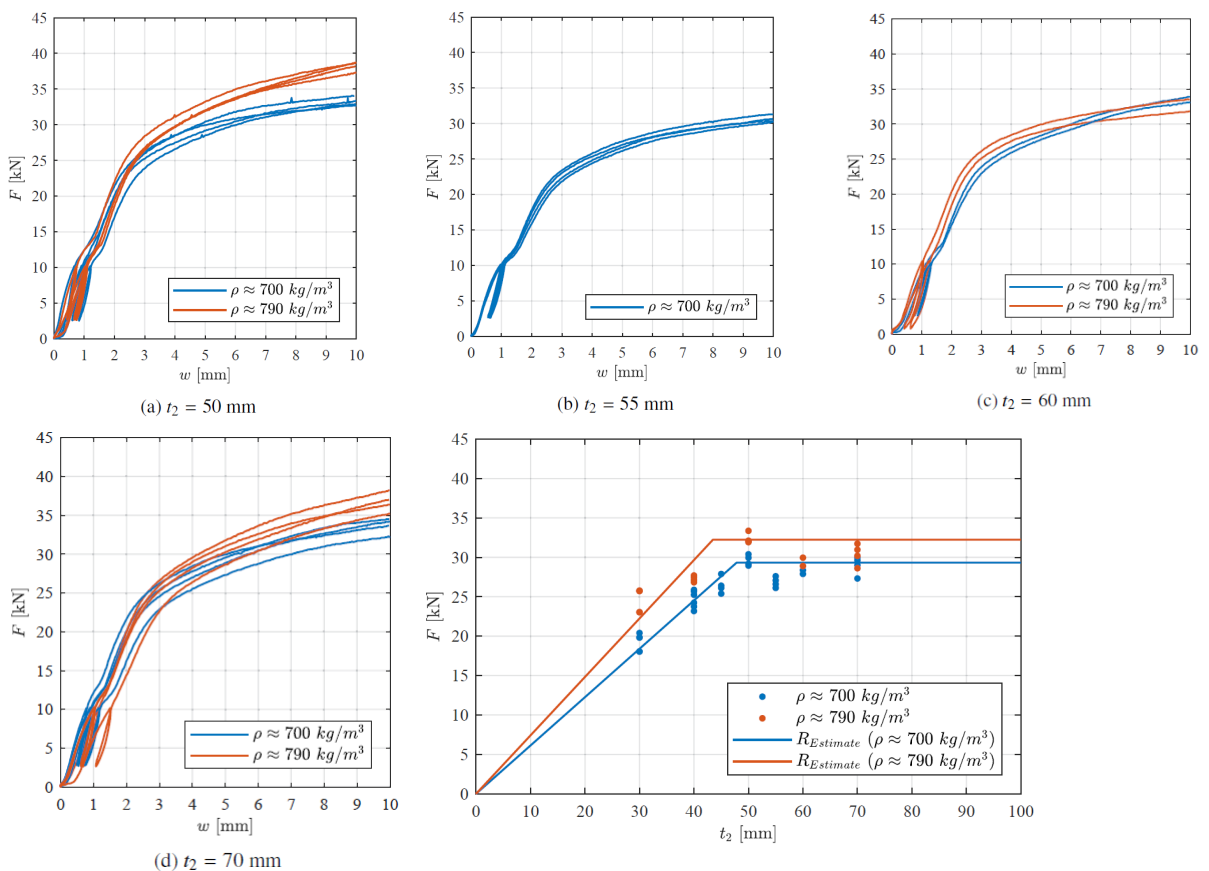


Abb. 95: Traglastkurven der Versuchsserien mit grösseren Mittelholzdicken, der Rohdichteklasse und Vergleich der einzelnen Traglasten mit der Johansen Theorie zur Bewertung des Versagensmodus, Möller (2017)

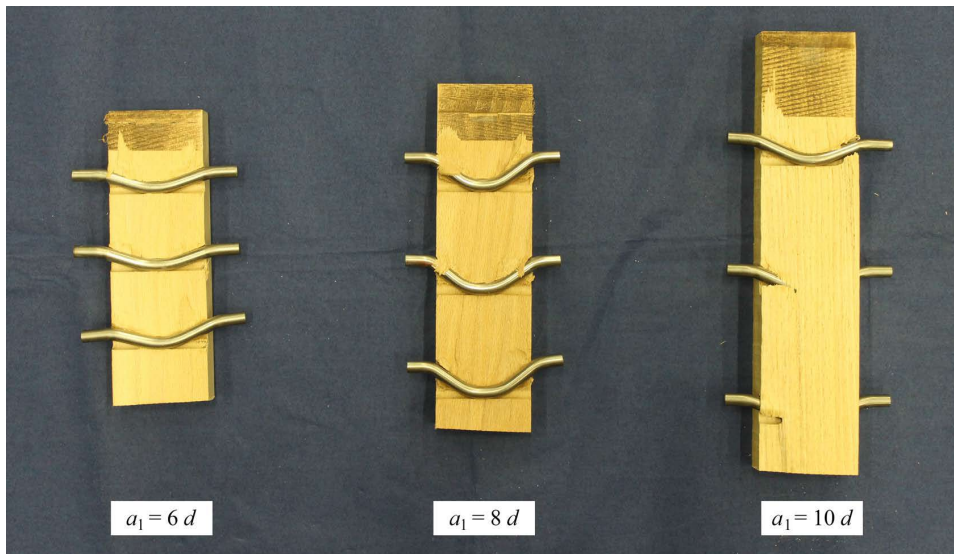


Abb. 96: Getestete und aufgespaltene Prüfkörper zur Versuchsserie mit Variation des Verbindungsmittelabstandes, Möller (2017)

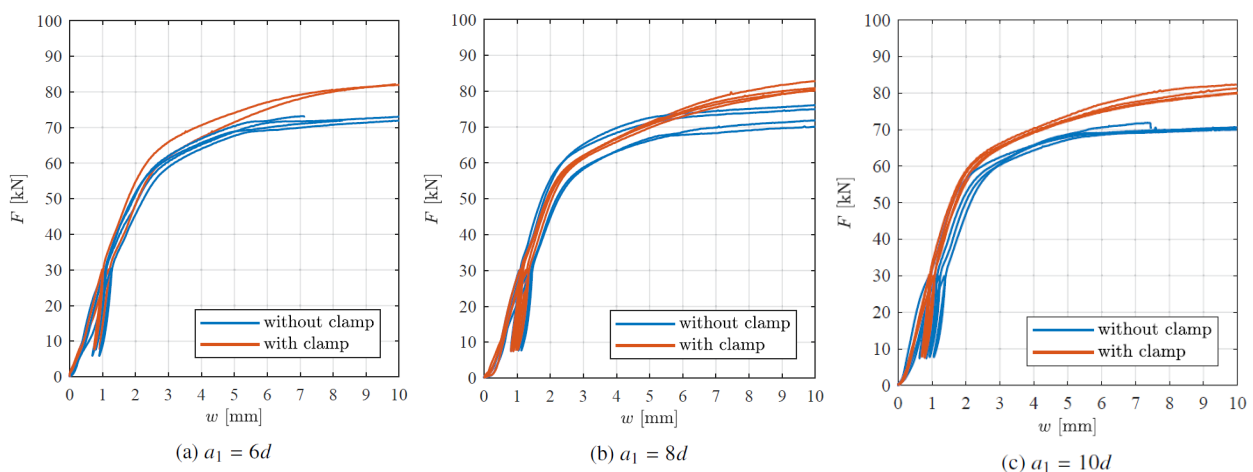


Abb. 97: Traglastkurven der Versuchsserien mit konstanter Mittelholzdicke unter Variation des Verbindungsmittelabstandes, Möller (2017)

5.2.2 Bestimmung der Seitenholzdicken

Die im Folgenden dargelegten Inhalte sind im Rahmen der Masterarbeit von Julia Katharina Möller (2017) an der ETH Zürich entstanden. Die Durchführung und Auswertung der Versuchsserien erfolgt an der ETH-Zürich durch die Masterstudierende in Betreuung durch Dr. Robert Jocker und Prof. Dr. Andrea Frangi. Die Versuchsserien umfassen Stabdübelverbindungen mit zwei dünnen innenliegenden Stahlblechen zur Bewertung der Seitenholzdicke unter Zugbeanspruchung parallel zur Faser, vgl. Abb. 98. Die Prüfkörper sind aus vorsortierten Vollholzlamellen respektive Brettschichtholz aus Buche geschnitten.



Abb. 98: Prinzipskizze zum Prüfkörperaufbau - Seitenholzdicke, Möller (217)

Tab. 8 Prüfprogramm, Mittelholzdicke, parallel zur Faser

Nr.	Anzahl VM $m \times n$	d [mm]	t_1 [mm]	t_2 [mm]	Verbindungsmittelabstände				Anzahl	b/h [mm]
					a_1	a_2	a_3	a_4		
110	1x1	8	24.5	59	-	-	9d	3d	2	108/160
111	1x1	8	27.0	59	-	-	9d	3d	2	113/160
112	1x1	8	29.5	59	-	-	9d	3d	2	118/160
113	1x1	8	32.0	59	-	-	9d	3d	2	123/160
114	1x1	8	34.5	59	-	-	9d	3d	2	128/160

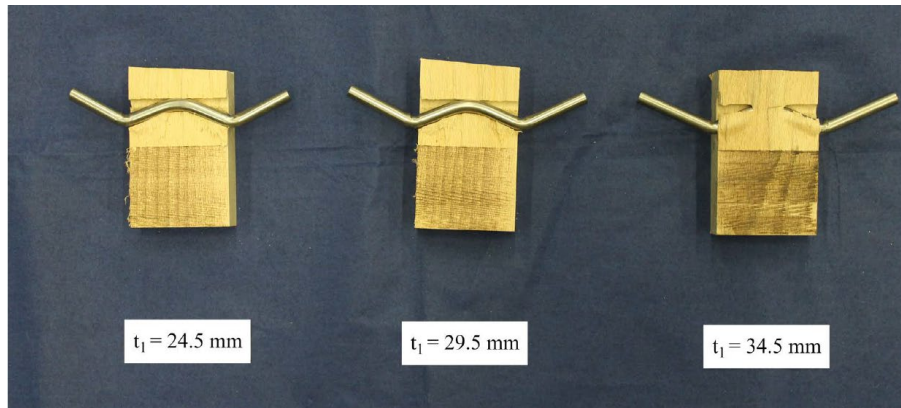


Abb. 99: Getestete und aufgespaltene Prüfkörper zur Versuchsserie Mittelholzdicke, Möller (2017)

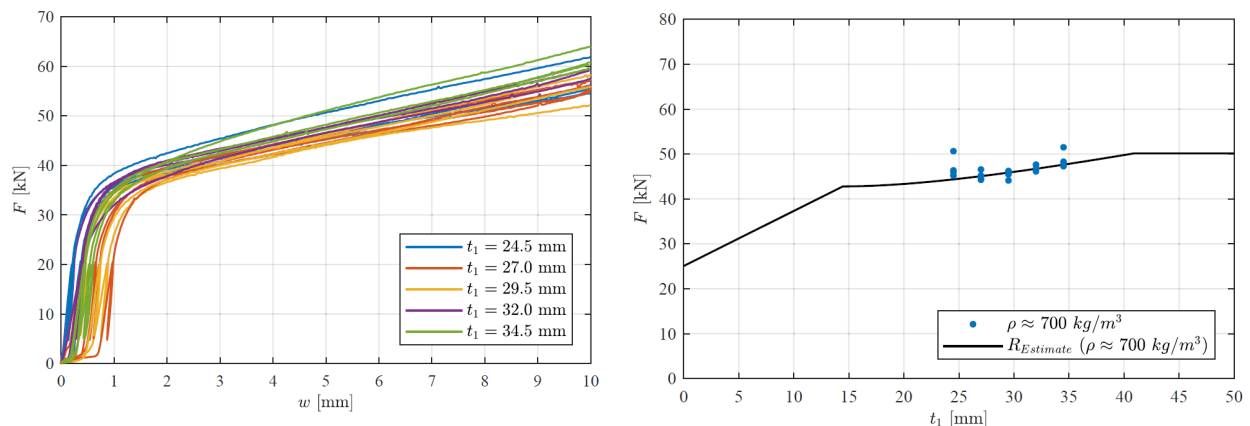


Abb. 100: Traglastkurven der Versuchsserien und Vergleich der einzelnen Traglasten mit der Johansen Theorie zur Bewertung des Versagensmodus, Möller (2017)

5.2.3 Versuchsserien mit mehrreihigem Stabdübelverbindungen

Die im folgenden dargelegten Inhalte sind im Rahmen der Masterarbeit von Julia Katharina Möller (2017) an der ETH Zürich entstanden. Die Durchführung und Auswertung der Versuchsserien erfolgt an der ETH-Zürich durch die Masterstudierende in Betreuung durch Dr. Robert Jocker, Prof. Dr. Andrea Frangi, Prof. Dr. Steffen Franke. Die Versuchsserien umfassen Stabdübelverbindungen mit ein, zwei und drei innenliegenden Stahlblechen zur Bewertung der Tragfähigkeit unter Zugbeanspruchung parallel zur Faser, vgl. Abb. 102. Die Prüfkörper sind aus Buchenstabschichtholz geschnitten, die Schlitz- und erforderlichen Bohrungen erfolgte in einer Abbundanlage. Die Prüfkörper wurden im Normalklima 20°/65% bis zum Versuch gelagert.

Es wurde von jeder Prüfkongfiguration zunächst nur ein Prüfkörper getestet und ausgewertet bevor der weitere Prüfkörper dieser Serie geprüft wurde. Anhand der ersten Ergebnisse erfolgte eine Anpassung im Rahmen des verfügbaren Spielraumes, um u.a. dem beobachteten Aufspalten entgegenzuwirken oder die rechnerische Auslastung zu erhöhen. Je Prüfkongfiguration waren 3

Prüfkörper vorgesehen, vgl. Tab. 9. Der dritte Prüfkörper wurde aufgrund der guten Korrelation der ersten zwei Prüfkörper mit den theoretischen Abschätzungen zur Prüfung von Unregelmäßigkeiten innerhalb des Abbundes vom Prüfprogramm zurückgestellt. Es wird ein planmässig erhöhtes Lochspiel von +1 mm bei 50 % der Stabdübel in der Verbindung vorgenommen.

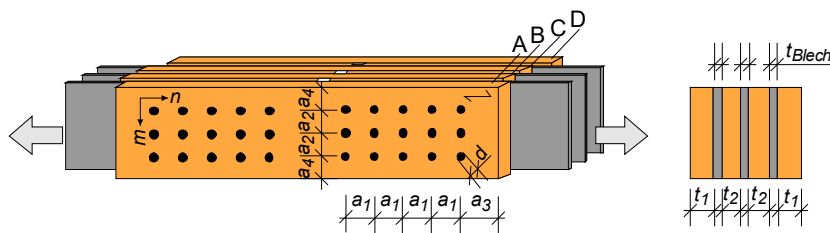


Abb. 101: Allgemeine Darstellung der mehrreihigen und -spaltigen Versuchsreihen mit Deklaration der Variablen

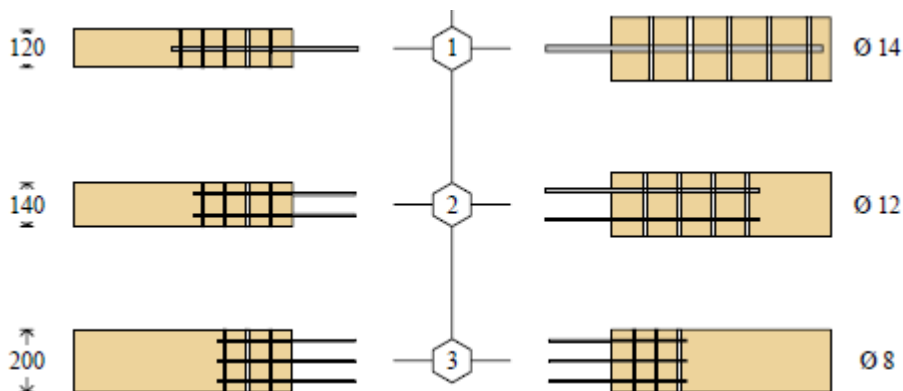


Abb. 102: Prinzipielle Darstellung des Versuchsprogramms zu mehrreihigen Verbindungen, Möhler (2017)

Tab. 9 Prüfprogramm, mehrreihige und -spaltige Stabdübelverbindungen, *mit Lochspiel geplant

Nr.-Pk.	Anzahl VM		Anzahl Bleche/Dicke	t_1 [mm]	t_2 [mm]	Verbindungsmittelabstände				Anzahl	b/h [mm]
	$m \times n$	d [mm]				a_1	a_2	a_3	a_4		
120-01	6x5	8	1/12 mm	54	-	$9d$	$4.5d$	$10d$	$2.5d$	1	120/220
120-02	6x5	8	1/12 mm	50	-	$9d$	$4.5d$	$10d$	$3d$	1	112/228
120-03*	6x5	8	1/12 mm	50	-	$9d$	$4.5d$	$10d$	$3d$	1	112/228
121-01	6x4	8	2/8 mm	32	60	$9d$	$4.5d$	$10d$	$2.5d$	1	140/220
121-02	6x3	8	2/8 mm	20	60	$9d$	$4.5d$	$10d$	$3d$	1	116/228
121-03*	6x4	8	2/8 mm	20	60	$9d$	$4.5d$	$10d$	$3d$	1	116/228
122-01	6x3	8	3/6 mm	32	59	$9d$	$4.5d$	$10d$	$2.5d$	1	200/220
122-02	6x3	8	3/6 mm	20	59	$9d$	$4.5d$	$10d$	$3d$	1	176/228
122-03*	6x3	8	3/6 mm	20	59	$9d$	$4.5d$	$10d$	$3d$	1	176/228
123-01	4x4	12	2/10 mm	48	84	$9d$	$4.5d$	$10d$	$2.5d$	1	200/220
123-02	4x4	12	2/10 mm	48	84	$9d$	$4.5d$	$10d$	$3d$	1	200/234
123-03*	4x4	12	2/10 mm	48	84	$9d$	$4.5d$	$10d$	$3d$	1	200/168
124-01	4x5	14	1/20 mm	90	-	$9d$	$4.5d$	$10d$	$2.5d$	1	200/220
124-02	4x5	14	1/20 mm	90	-	$9d$	$4.5d$	$10d$	$3d$	1	200/240
124-03*	4x5	14	1/20 mm	90	-	$9d$	$4.5d$	$10d$	$3d$	1	200/240

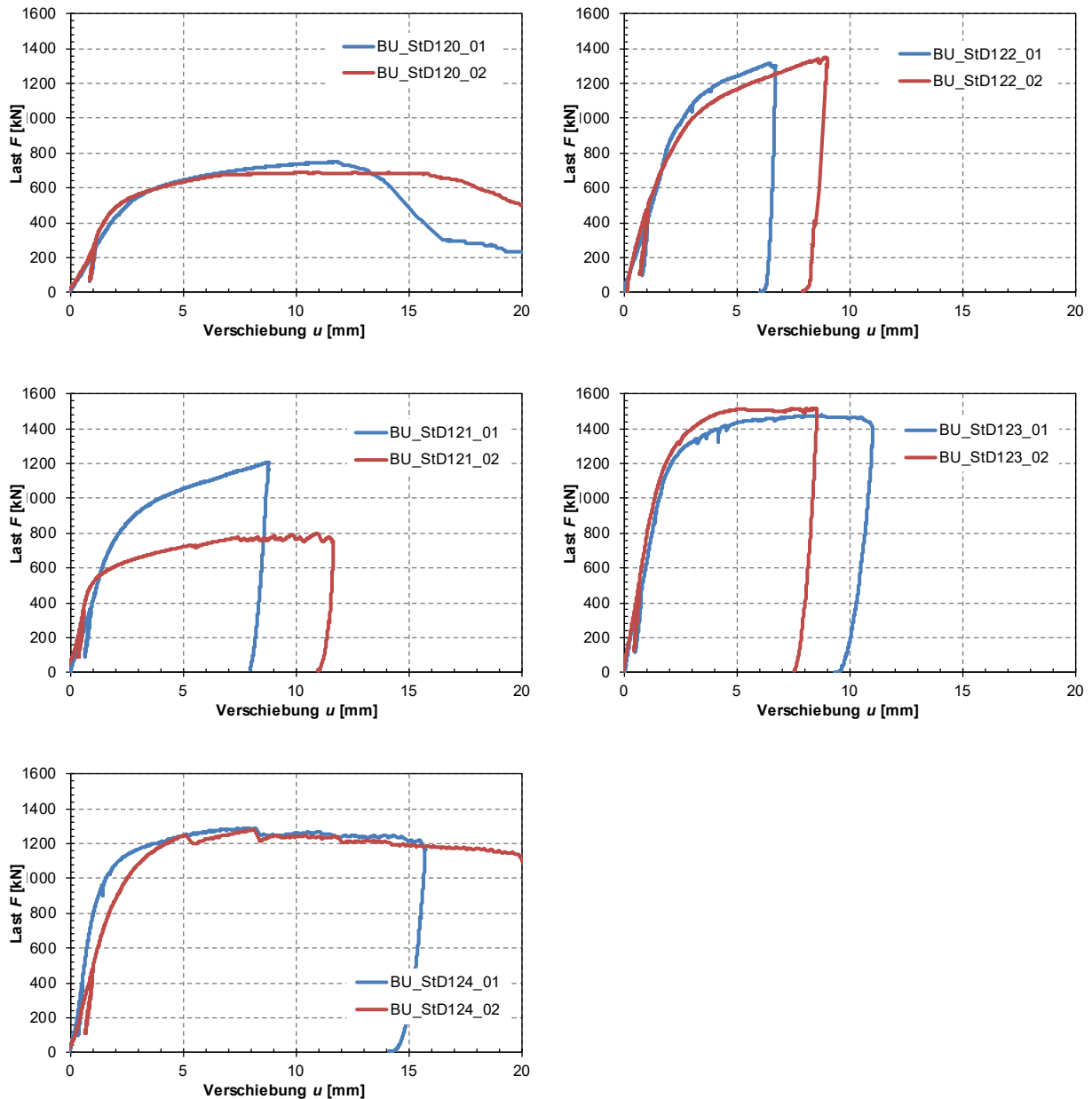


Abb. 103: Traglastkurven je Prüfserie

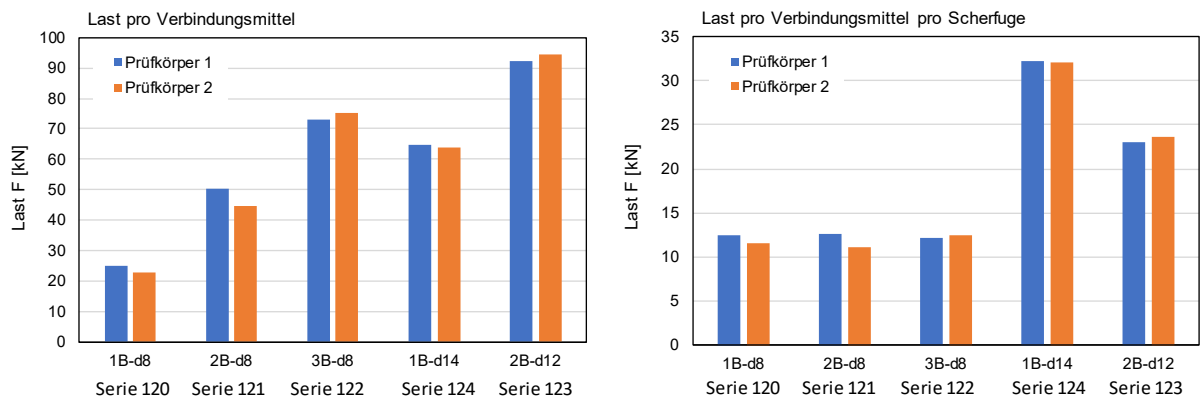


Abb. 104: Traglasten pro Verbindungsmittel (links) und pro Verbindungsmittel und Scherfuge (rechts)

Das Versagen der ersten Prüfkörper zeigte ein Aufspalten des Holzes in den äusseren Reihen und die Ausbildung der Fliessgelenke nach Modus 3 nach Johansen (1949), vgl. Abb. 105. Aus diesem

Grund wurde im Rahmen der verfügbaren Rohholzabmessungen in den zweiten Prüfkörpern der Randabstand a_4 von $2.5d$ auf $3d$ erhöht und gleichzeitig die Seitenholzdicken von 54 mm auf 50 mm reduziert, um die Ausnutzung der Verbindung zu erhöhen. In den Traglasten können für einen Teil der Verbindungen gleichwertig oder höhere Traglasten erreicht werden. Für Serie 120 wurde im Prüfkörper 2 die Anzahl der Verbindungsmittelreihen von $m \times n = 6 \times 4$ auf 6×3 verringert.

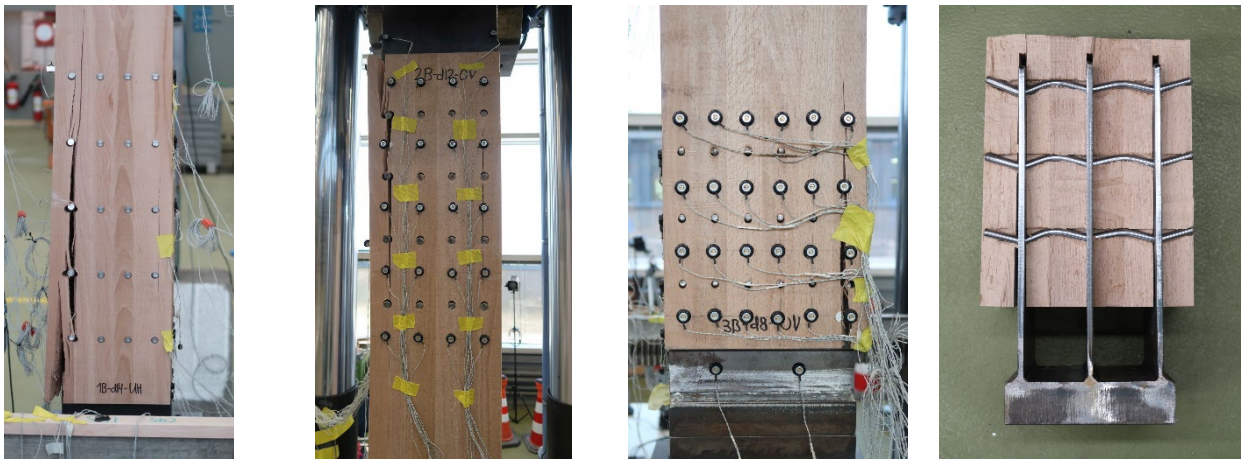


Abb. 105: Aufspalten des Holzes in den äusseren Verbindungsmittelreihen, unabhängig von der Blechanzahl, von links nach rechts: Serie 120 mit 1 Blech, Serie 121 mit 2 Blechen, Serie 122 mit 3 Blechen und Ausbildung der Fliessgelenke

5.3 Senkrecht zur Faserrichtung

5.3.1 Versuchsserien zu Bestimmung der Mittelholzdicke

Die Versuchsserie umfasst Stabdübelverbindungen mit dicken aussenliegenden Stahlblechen zur Bewertung der Mittelholzdicke unter Zugbeanspruchung senkrecht zur Faser, vgl. Abb. 102. Die Prüfkörper sind aus Vollholz geschnitten. Die Prüfkörper wurden im Normalklima $20^\circ\text{C}/65\%$ relative Luftfeuchte bis zum Versuch gelagert. Die Anschlusshöhe betrug konstant $0.7h$. Die Angaben der Holzfeuchte und Rohdichte sind im Anhang dargelegt.

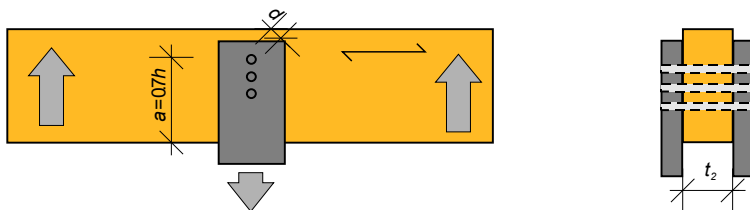


Abb. 106: Prinzipskizze für Prüfserien senkrecht zur Faser, Mittelholzdicke

Tab. 10 Prüfprogramm, Stabdübelverbindungen senkrecht zur Faser, Mittelholzdicke

Nr.-PK	Anzahl VM	d [mm]	Anzahl Bleche/Dicke	t_1 [mm]	t_2 [mm]	Verbindungsmittelabstände				Anzahl	b/h [mm]
	$m \times n$					a_1	a_2	a_3	a_4		
150	1x3	8	2/8 mm	-	30	-	$3d$	-	-	3/3	30/160
151	1x3	8	2/8 mm	-	40	-	$3d$	-	-	3/3	40/160
152	1x3	8	2/8 mm	-	50	-	$3d$	-	-	3/3	50/160
153	1x3	8	2/8 mm	-	60	-	$3d$	-	-	3/3	60/160

Die Prüfungen wurden zweistufig durchgeführt, zunächst wurden die Prüfkörper im Biegeversuch mit relativ kurzer Spannweite von 800 mm getestet, vgl. Abb. 109. Das Tragverhalten wurde aber massgeblich durch Querkzugversagen begrenzt, wie in den Traglastkurven und den Traglasten

ersichtlich, vgl. Abb. 107 und Abb. 112. Die Versuchsserien konnten nicht zur Abschätzung der Mittelholzdicke verwendet werden. Aus diesem Grund sind in einer zweiten Stufe Druckversuch mit vollflächiger Auflagerung zur Reduzierung des Querzugeinflusses durchgeführt worden, vgl. Abb. 109.

Die enthaltenen Prüfserien im Prüfprogramm lt. Tab. 10 wurden umfänglich mit beiden Methoden getestet. Die erreichten Traglastkurven für die Biegung- und Druckversuche sind in Abb. 112 je Prüfungsart und Prüfserie und im Vergleich anhand der gemittelten Kurven dargestellt. Die Auswertung der Traglasten der Druckversuche zeigt, dass auch hier der Versuchsaufbau einen Einfluss auf das Tragverhalten hat. Der Druckversuch führt zu einer Überschätzung des Tragverhaltens. Hier wird das Versagen durch die nicht erreichbare Endfestigkeit der Lochleibung überhöht. Für die Abschätzung der Mittelholzdicke wurden die Lasten aus den Druckversuchen bei 15 mm Verschiebung ausgewertet und dem analytischen Modell von Johansen in der EN 1955-1-1:2004 gegenübergestellt, vgl. Abb. 107. Die Traglasten bei 15 mm Verschiebung wurde auch für die Bewertung von Bemessungsansätzen in Anlehnung an die Norm SN EN 26891:1991 zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Verbindungen mit mechanischen Verbindungsmitteln ausgewertet, s. Abb. 108. In dem weiteren Prüfprogramm wird eine Mittelholzdicke von 55 mm verwendet.

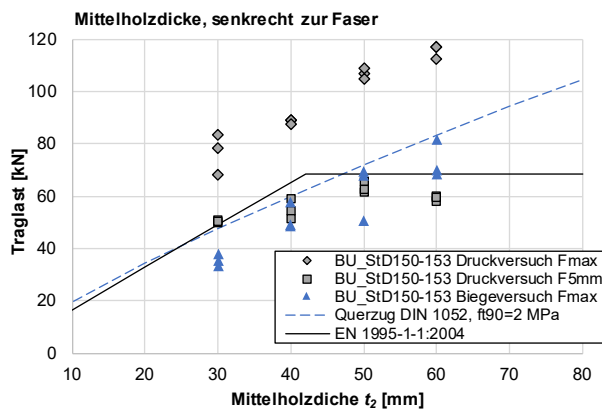


Abb. 107: Individuelle Traglasten gruppiert je Versuchsaufbau und Vergleich zu analytischen Querzugfestigkeit und Johansen-Theorie

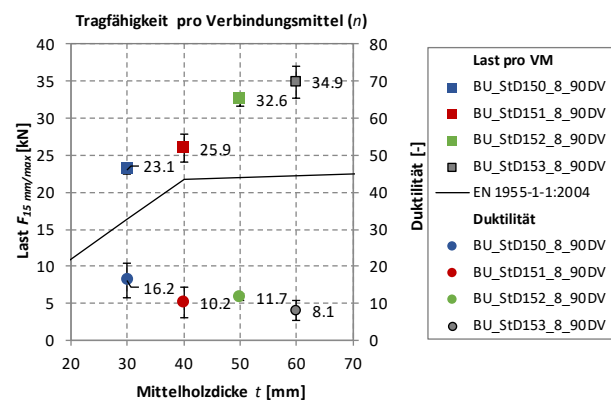


Abb. 108: Traglasten und Duktilität pro Verbindungsmittel bei 15 mm Verschiebung in Abhängigkeit zur Mittelholzdicke unter Angabe der Standardabweichung zum Mittelwert je Prüfserie



Abb. 109: Versuchsaufbau für Prüfserien zur Mittelholzdicke, senkrecht zur Faser beansprucht, Biegeversuch (links) und Druckversuch (rechts)



Abb. 110: Exemplarische Darlegung eines aufgesägten Prüfkörpers je Prüfserie im Biegeversuch, Serie 150-153 (v. l. n. r.), keine respektive geringe Ansätze zur Ausbildung von Fließgelenken

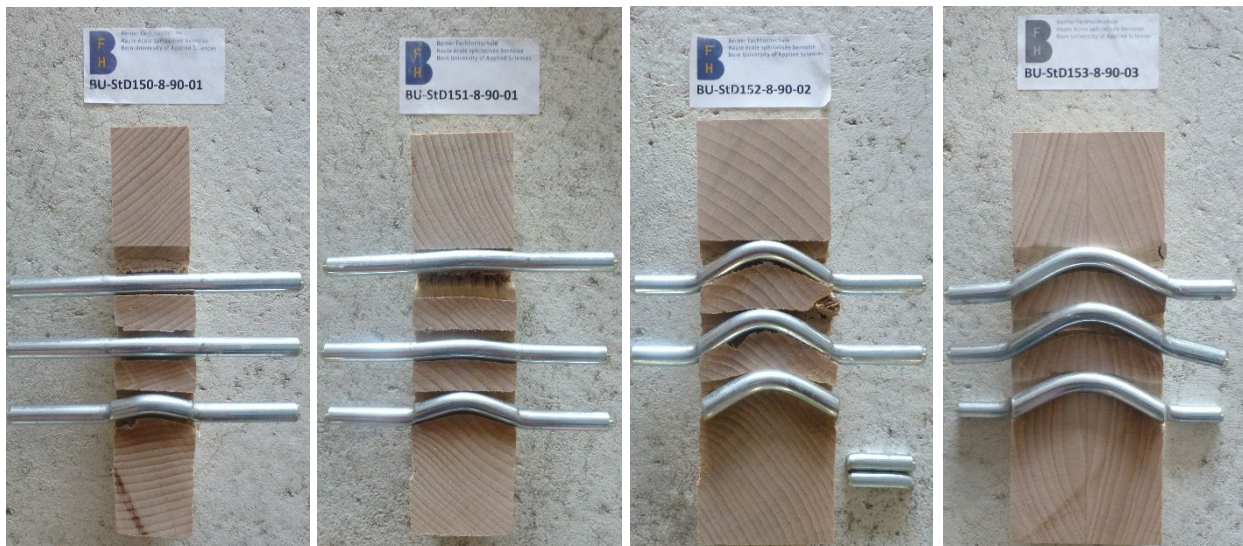


Abb. 111: Exemplarische Darlegung eines aufgesägten Prüfkörpers je Prüfserie im Druckversuch, Serie 150-153 (v. l. n. r.), deutlich ausgebildete Fließgelenke in der obersten Verbindungsmittelreihe (reverse getestet)

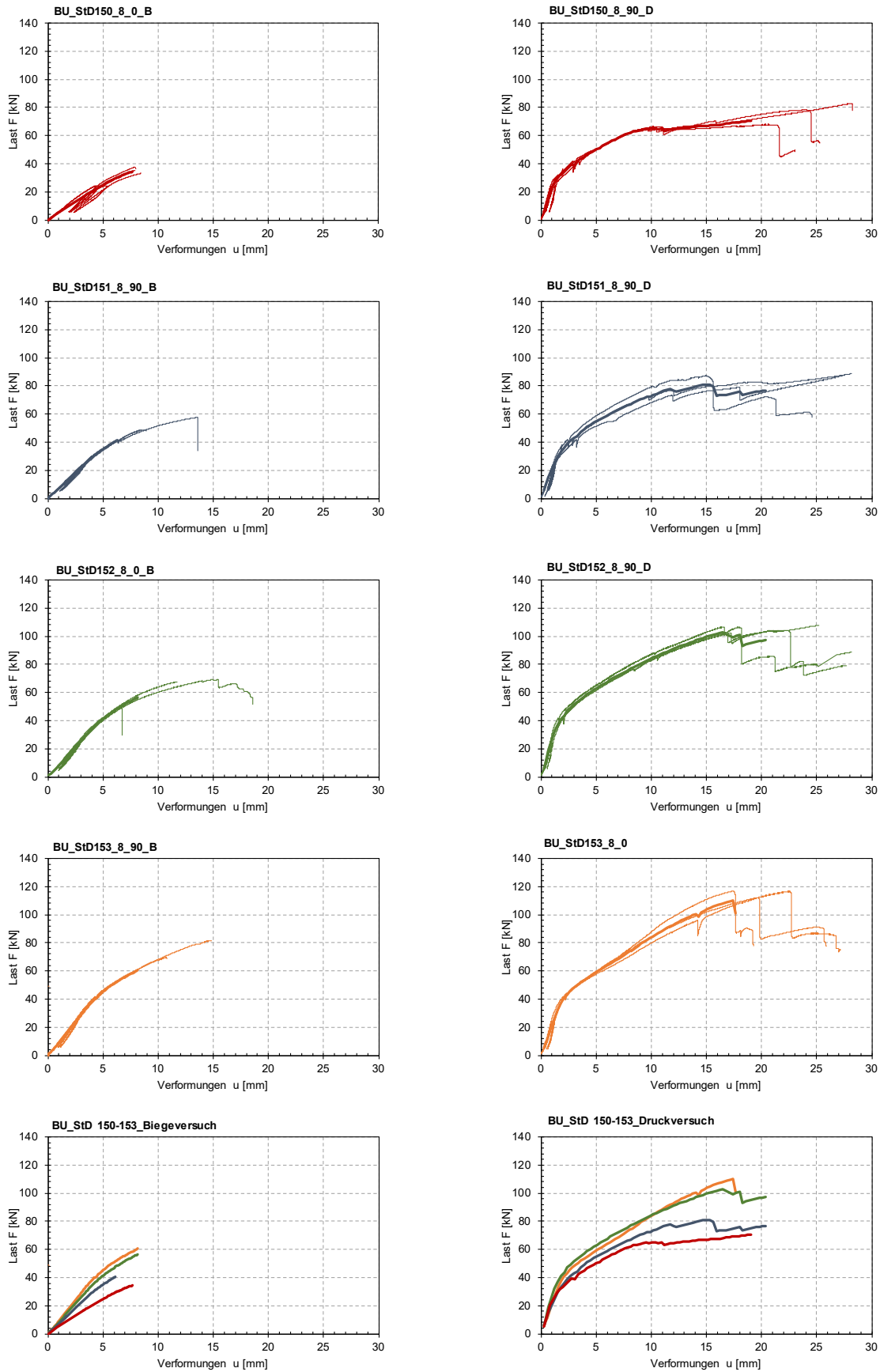


Abb. 112: Traglastkurven je Prüfserie und Vergleich untereinander anhand der gemittelten Kurven

5.3.2 Versuchsserien zur Bestimmung der Seitenholzdicken

Die Versuchsserie umfasst Stabdübelverbindungen mit zwei innenliegenden Stahlblechen zur Bewertung der Seitenholzdicke unter Zugbeanspruchung senkrecht zur Faser, vgl. Abb. 113. Die Prüfung erfolgte mit reduzierte Stützweite (nahe an Verbindung), in dem die Prüfkörper seitlich gehalten und die Stahlbleche mit der Prüfmaschine nach oben gezogen wurden, vgl. Abb. 114. Die Prüfkörper sind aus Buchenstabschichtholz geschnitten. Die Prüfkörper wurden im Normal-klima 20 °C/65 % bis zum Versuch gelagert, die Angaben zur Holzfeuchte und Rohdichte sind im Anhang aufgeführt. Die Anschlusshöhe betrug konstant $0.8h$.

Die Traglastkurven der individuellen Prüfserien sind in Abb. 115 dargestellt und anhand der gemittelten Kurven miteinander verglichen. Die Traglasten sind erneut bei 15 mm oder Erreichen der Höchstlast für die weitere Bewertung der Bemessungsansätze ausgewertet und gemeinsam mit der Duktilität in Abb. 116 in Abhängigkeit der Seitenholzdicke dargestellt. Die betrachteten Seitenholzdicken führen alle zum Modus 2 der Johansen Theorie.

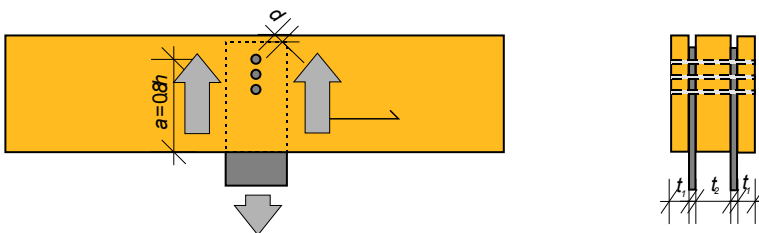


Abb. 113: Prinzipskizze für Prüfserien mit zwei innenliegenden Stahlblechen senkrecht zur Faser, Betrachtung der Seitenholzdicke

Tab. 11 Prüfprogramm, Stabdübelverbindungen senkrecht zur Faser, Betrachtung der Seitenholzdicke

Nr.-PK	Anzahl VM		Anzahl	t_1	t_2	Verbindungsmittelabstände				Anzahl	b/h
	$m \times n$	d				a_1	a_2	a_3	a_4		
154	1x3	8	2/8 mm	15	55	-	$3d$	-	-	3	101/160
155	1x3	8	2/8 mm	20	55	-	$3d$	-	-	3	111/160
156	1x3	8	2/8 mm	25	55	-	$3d$	-	-	3	121/160



Abb. 114: Versuchsaufbau zum Einfluss der Seitenholzdicke bei Verbindungen mit 2 innenliegenden Stahlblechen (links), Querzugversagen in oberster Verbindungsmittelreihe (Mitte), verformte Stabdübel am aufgeschnittenen Prüfkörper (rechts)

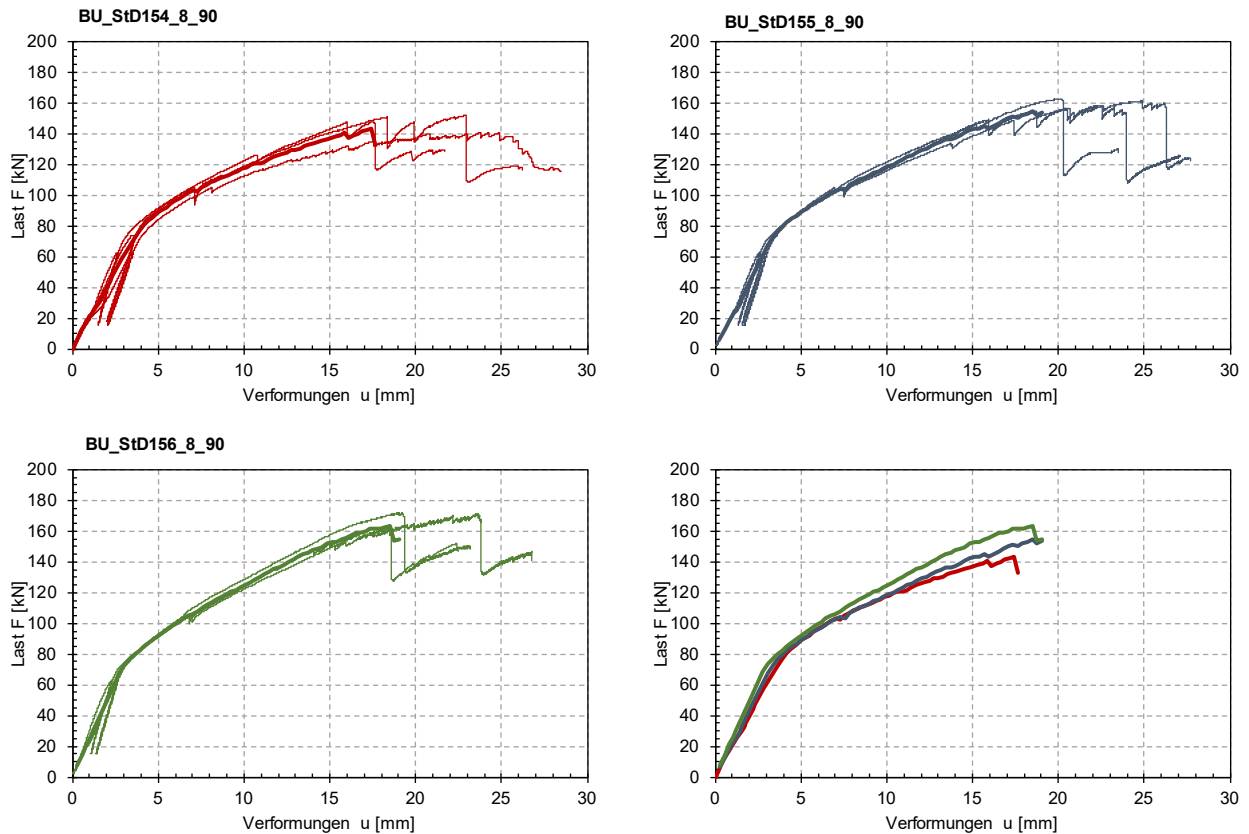


Abb. 115: Traglastkurven je Prüfserie und Vergleich der gemittelten Traglastkurven

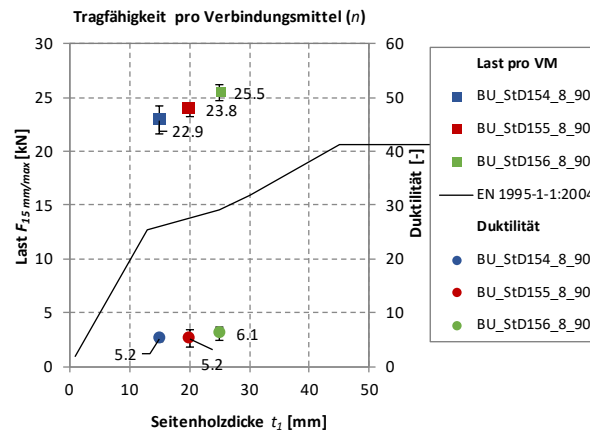


Abb. 116: Traglasten und Duktilität in Abhängigkeit der Seitenholzdicke t_1 unter Angabe der Standardabweichung zum Mittelwert je Prüfserie

5.3.3 Grossformatige Verbindungen senkrecht zur Faser

Die Versuchsserie umfasst mehrreihige und -spaltige Stabdübelverbindungen mit einem innenliegenden Stahlblech zur Bewertung der Seitenholzdicke und der Anschlussgeometrie unter Zugbeanspruchung senkrecht zur Faser, vgl. Tab. 12 und Abb. 102. Die Prüfserien unterschieden sich in der Anzahl der Spalten der Verbindungsmittel parallel zur Kraftrichtung und des Verbindungsmittelabstandes a_2 . Die Anschlussbreite a wurde in allen Prüfserien konstant gehalten. Die Prüfkörper sind aus Buchenstabschichtholz geschnitten. Die Prüfkörper wurden im Normklima 20 °C/65 % relative Luftfeuchte bis zum Versuch gelagert. Für die jeweiligen Prüfkörper sind die Holzfeuchte und Rohdichte im Anhang dargelegt. Die Anschlusshöhe betrug konstant $0.8h$. Die Versuche wurden mit reduzierter Stützweite von 270 mm als Biegeversuch durchgeführt, vgl. Abb. 118.

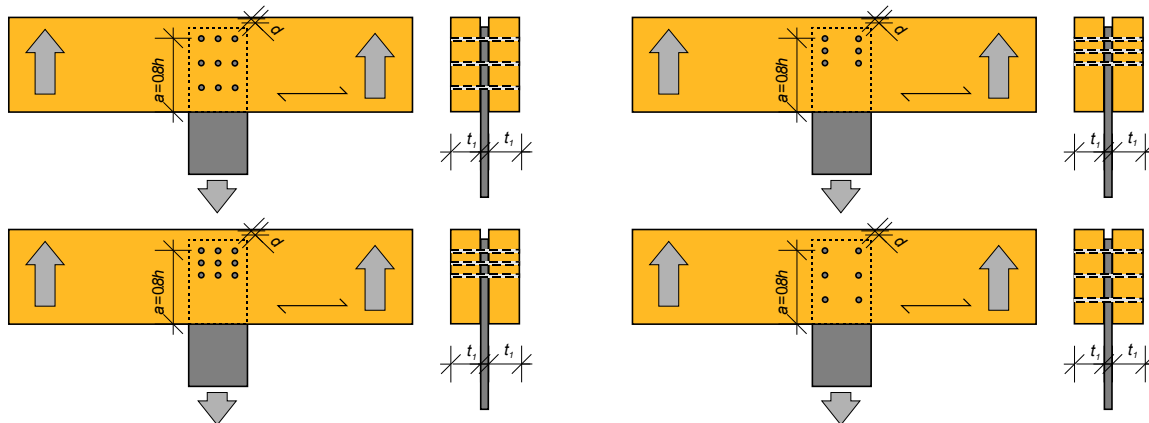


Abb. 117: Prinzipskizze für Prüfserien senkrecht zur Faser, $m \times n = 3 \times 3$ (links) und $m \times n = 2 \times 3$ (rechts)

Tab. 12 Prüfprogramm, Stabdübelverbindungen senkrecht zur Faser

Nr.-PK	Anzahl VM		Anzahl Bleche/Dicke	t_1 [mm]	t_2 [mm]	Verbindungsmittelabstände				Anzahl	b/h [mm]
	$m \times n$	d [mm]				a_1	a_2	a_3	a_4		
171	3x3	8	1/8 mm	50	-	$5d$	$6d$	$\geq 4d$	-	3	108/160
172	3x3	8	1/8 mm	50	-	$5d$	$3d$	$\geq 4d$	-	3	108/160
173	2x3	8	1/8 mm	50	-	$10d$	$6d$	$\geq 4d$	-	3	108/160
174	2x3	8	1/8 mm	50	-	$10d$	$3d$	$\geq 4d$	-	3	108/160

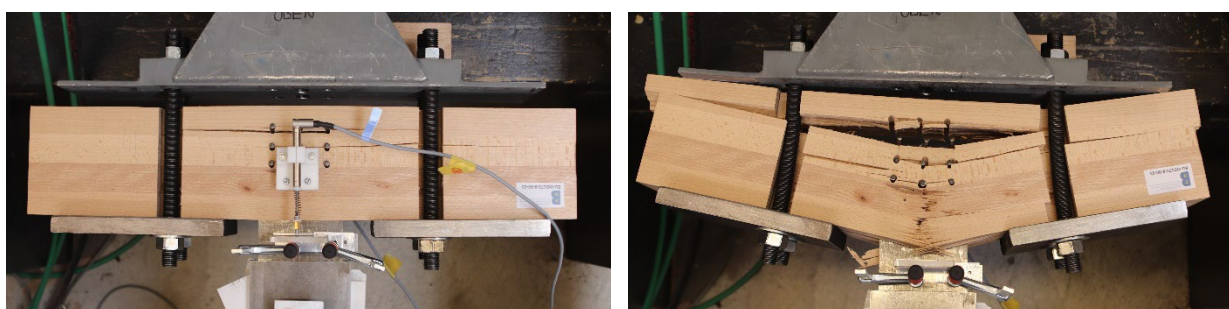


Abb. 118: Versuchsaufbau und versagter Prüfkörper der Prüfserie 172

Die erreichten Traglastkurven je Prüfkörper und der Vergleich der gemittelten Traglastkurven ist in Abb. 120 dargestellt. Der Vergleich der mittleren Traglasten pro Verbindungsmittel zeigt, dass eine Erhöhung der Anzahl der Spalten nicht zu einer m -fachen Erhöhung der Traglasten führt. Die Verbindungsmittel in den Randspalten der Verbindung dienen hauptsächlich zur Lastübertragung, Abb. 121. Die mittlere bzw. innere Stabdübelreihe trägt kaum zum Tragverhalten bei, dies wurde bereits in Franke (2008) gezeigt. Die Reduzierung des Verbindungsmittelabstandes zu kompakteren Verbindungen führt zu einer Traglaststeigerung unabhängig von der Anzahl der Verbindungsmittelreihen. Die Prüfserien bilden alle Fliessgelenke aus, wobei die Prüfserien mit reduzierter Anzahl an Verbindungsmittelspalten höhere Verformungen in den Stabdübeln zeigen, vgl. Abb. 122.

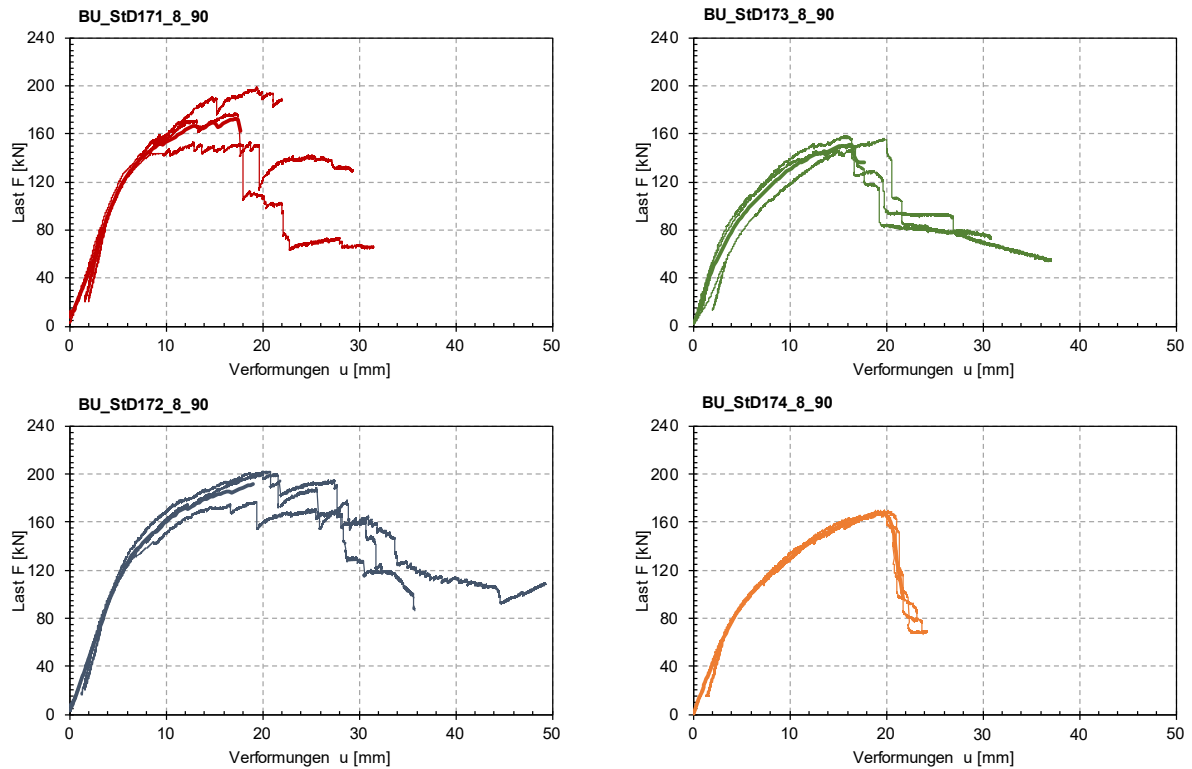


Abb. 119: Traglastkurven je Prüfserie für mehrreihige Verbindungen senkrecht zur Faser

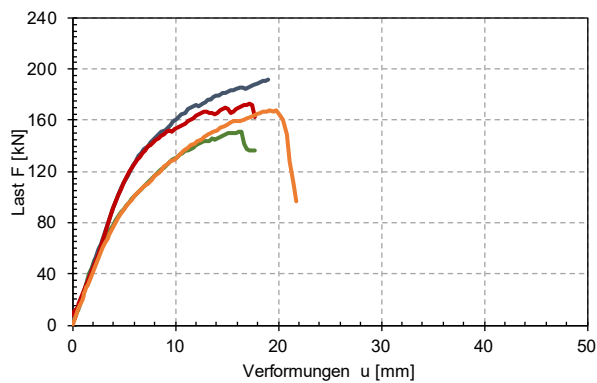


Abb. 120: Vergleich gemittelte Traglastkurven je Prüfserie

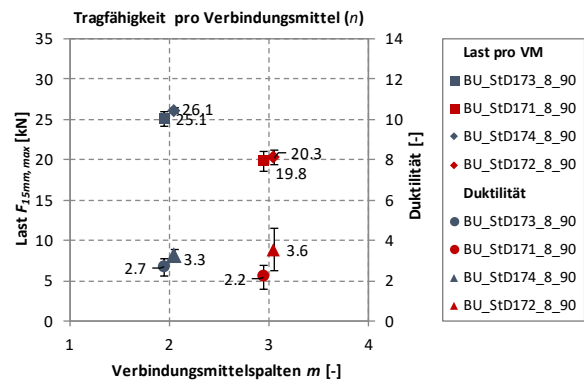


Abb. 121: Vergleich der Traglasten pro Verbindungsmittel und Duktilität auf Mittelwertniveau mit Angabe der Standardabweichung



Abb. 122: Versagensfälle innerhalb der Hauptversuchsserien senkrecht zur Faser der Prüfserien BU-StD171-174 (von links nach rechts)

6 Diskussion der Ergebnisse

6.1 Mindestrand- und Mindestverbindungsmitteabstände

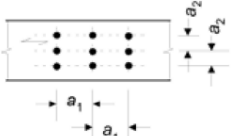
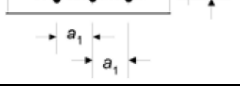
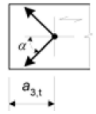
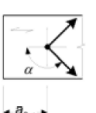
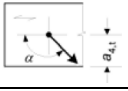
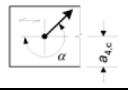
Für Verbindungen parallel zur Faser wurden die Abstände untereinander in Faserrichtung a_1 , senkrecht zur Faserrichtung a_2 sowie der Randabstand in Faserrichtung a_3 an Verbindungen mit innenliegenden Stahlblech mit $m \times n = 2 \times 3$ Stabdübeln mit Durchmesser von $d = 8$ mm untersucht, vgl. Abschnitt 4.6. Für Verbindungen senkrecht zur Faser wurden nur die Abstände untereinander in Faserrichtung a_1 und senkrecht zur Faser a_2 an Verbindungen mit innenliegendem Stahlblech mit $m \times n = 3 \times 2$ Stabdübeln mit Durchmesser von $d = 8$ mm betrachtet. Es wurden jeweils 5 Prüfkörper zu den Abstufungen $a_1 = 3d, 5d, 7d$ und $9d$ durchgeführt.

Im Hinblick auf Verbindungen mit duktilen Tragverhalten, $D > 3$ als Vorgabe im Forschungsprojekt laut SIA 265:2012 Ziffer 6.1.2.3 und den Ergebnissen der Abschnitten 4.6 und 4.7 (vgl. jeweils Zusammenfassung und Schlussfolgerungen), werden Mindestrand- und Verbindungsmitteabstände, abweichend von den in der SIA 265:2012 und Eurocode 5 angegebenen, für Buchenholz wie in Tab.15 empfohlen. Die erarbeiteten Mindestabstände sind den aktuellen normativen Regelungen der SIA und EC5 gegenübergestellt.

Für die Stabdübelverbindungen parallel zur Faser ergeben sich zwei Konstellationen, die das Kriterium der Duktilität erfüllen;

- $9d$ und mehr Abstand der Stabdübel untereinander in Krafrichtung mit einem $3d$ Abstand untereinander senkrecht zur Krafrichtung, siehe Abb. 31
- sowie $7d$ Abstand der Stabdübel untereinander in Krafrichtung mit $4d$ Abstand untereinander senkrecht zur Krafrichtung, siehe Abb. 42, oder bei Verwendung von Verstärkungen gegen Aufspalten.

Tab. 13 Minimale Abstände für Stabdübel, Passbolzen sowie Bolzen

Abstand		SIA 265:2012	SN EN 1995-1-1:2014	Buche
a_1 parallel zur Faserrichtung		$7d$	$(3 + 2 \cos \alpha)d$	$9d^{1),2)}$
a_2 rechtwinklig zur Faserrichtung		$3d$	$3d$	$3d^{1),2)}$
$a_{3,t}$ beanspruchtes Hirnholzende $-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$		$\max \left\{ \begin{matrix} 7d \\ 80 \text{ mm} \end{matrix} \right\}$	$\max \left\{ \begin{matrix} 7d \\ 80 \text{ mm} \end{matrix} \right\}$	$9d^{1),2),3)}$
$a_{3,c}$ unbeanspruchtes Hirnholzende $90^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$ $150^\circ \leq \alpha \leq 210^\circ$ $210^\circ \leq \alpha \leq 270^\circ$		$5d$	$a_{3,t} \sin \alpha $ $\max \{3, 5d; 40 \text{ mm}\}$ $a_{3,t} \sin \alpha $	$5d$
$a_{4,t}$ beanspruchter Rand $0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$		$4d$	$\max \{ (2 + 2 \sin \alpha)d; 3d \}$	$4d$
$a_{4,c}$ unbeanspruchter Rand $180^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$		$3d$	$3d$	$3d$

¹⁾ Anhand von Versuchsergebnissen empfohlen

²⁾ $7d$, wenn $a_2 \geq 4d$ oder Ausführung mit Verstärkungen gegen Aufspalten

³⁾ $5d$ wenn Ausführung mit Verstärkungen gegen Aufspalten

6.2 Grundlagenparameter Lochleibungsfestigkeiten

Für die Lochleibungsfestigkeit in Verbindungen mit Stabdübeln und Passbolzen liegen bereits in der Literatur verschiedene Ansätze vor, die in Abb. 123 verglichen sind. Die Ansätze sind unterschiedlich auf dem Mittelwertniveau oder charakteristischen Niveau abgeleitet. Die Ansätze in der SIA 265:2012 und Eurocode 5 sind jeweils gleich. Es ist auffällig, dass im Mittelwertniveau, Abb. 123 links, die Lochleibungsfestigkeit der Standards die untere Grenze beschreibt und auf charakteristischem Niveau mittlere respektive hohe Werte für Laubholz liefert, Abb. 123 rechts.

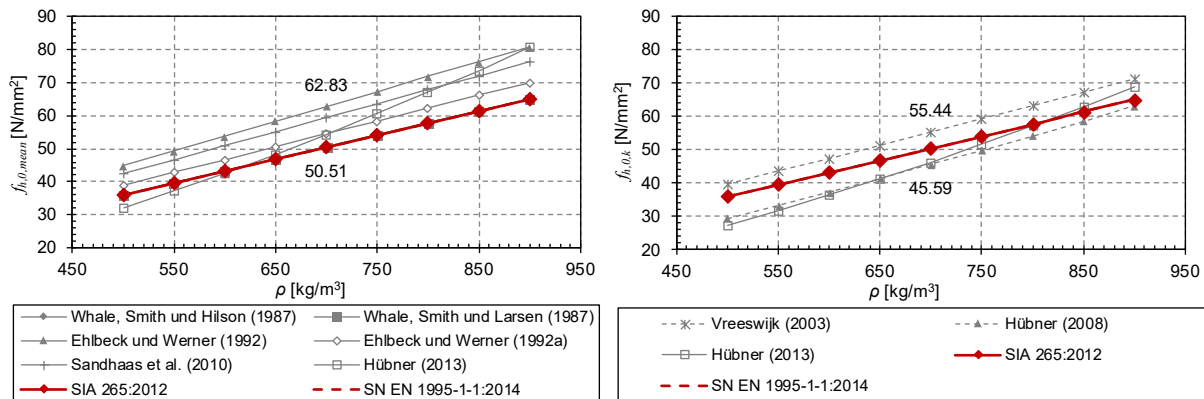


Abb. 123: Vergleich der Lochleibungsfestigkeit für $d = 12$ mm parallel zur Faser aus Norm und Literatur auf Mittelwert- und charakteristischem Niveau $f_{h,0,mean}$ und $f_{h,0,k}$

6.3 Anzahl der Verbindungsmittel in Lastrichtung

Aus allen relevanten Versuchen (ohne Verbindungen mit 1 StD, geringeren Seitenholzdicken) mit Stabdübeln mit 8 mm Durchmesser ergibt sich eine mittlere Bruchtraglast von 22.2 kN pro Schlitzblech (zwei Scherflächen) mit einem Variationskoeffizienten von 7.4 %. Die Versuche zeigten bei den relevanten Verbindungen grosse plastische Verformungen mit der Ausbildung von 2 Fließgelenken. Durch die Vorgabe und Erreichung des duktilen Tragverhaltens wird hierdurch die grösstmögliche Traglast erreicht und ein vorzeitiges Versagen durch Aufspalten o. ä. weitgehend verhindert. Die Traglast kann so ohne eine Abminderung der Anzahl hintereinander angeordneten Verbindungsmittel (k_{red} bzw. n_{ef}) berechnet werden, siehe Tab. 14.

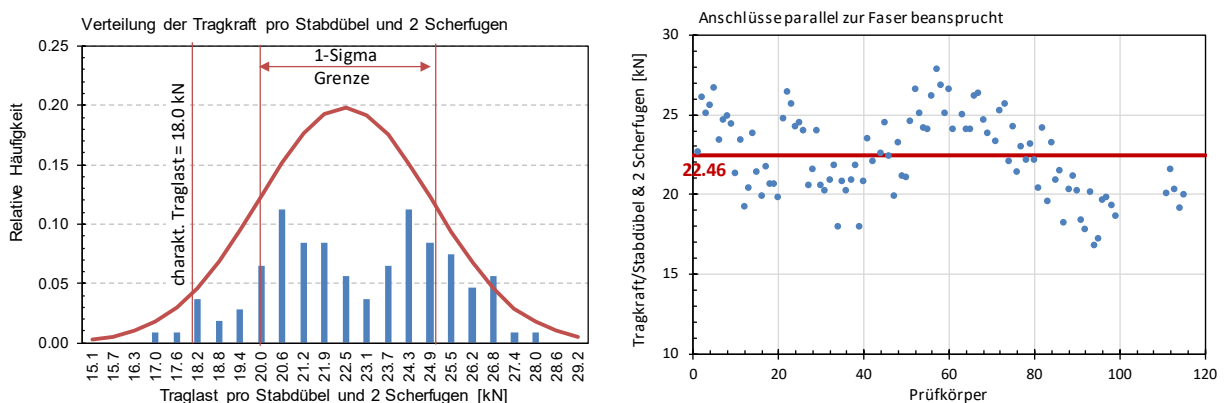


Abb. 124: Diagramm zur Darstellung der mittleren Bruchlasten pro Stabdübel und 2 Scherfugen aller getesteten Verbindungen parallel zur Faser beansprucht

Tab. 14 Berücksichtigung von mehreren in Lastrichtung hintereinander angeordneten Verbindungsmitteln

	Lastrichtung parallel zur Faser	Lastrichtung senkrecht zur Faser
SIA 265:2012	$n_{ef} = n \cdot k_{red} = n \cdot n^{-0.1} \sqrt[4]{\frac{a_1}{10d}}$	$n_{ef} = n$
EN 1995-1-1:2004	$n_{ef} = \min \begin{cases} n \\ n^{0.9} \sqrt[4]{\frac{a_1}{13d}} \end{cases}$	$n_{ef} = n$
Buche^{*)}	$n_{ef} = n$	$n_{ef} = n$

^{*)} unter Einhaltung der Mindestabstände und -seitenholzdicken nach Tab. 13

6.4 Tragfähigkeit und Bemessung

6.4.1 Allgemein

Für die Bewertung des Tragverhalten von Stabdübel-/Passbolzenverbindungen parallel zur Faser beansprucht wurden der Einfluss der Holzdicke t_1 und t_2 , des Verbindungsmitteldurchmessers d , der Anzahl der Verbindungsmittel in Krafrichtung n und der Reihen m parallel zur Krafrichtung untersucht. Die Analyse des Bemessungsmodells beinhaltet die kleinformatige Prüfserien mit vorrangig 2-reihigen Verbindungen (bis ca. 400 kN) und die Prüfserien mit praxisrelevanten Querschnittsgrößen und Beanspruchungen (bis ca. 1500 kN) mit folgenden Variationen:

- Seitenholzdicke $t_1 = 20$ bis 50 mm
- Mittelholzdicke $t_2 = 30$ bis 70 mm
- Verbindungsmitteldurchmesser $d = 8, 12, 14, 20$ mm
- Anzahl der Verbindungsmittel pro Reihe $n = 1, 2, 3, 5, 7$
- Anzahl der Verbindungsmittelreihen $m = 1, 2, 3, 4, 6$
- Anzahl der Schlitzbleche innenliegend 1, 2, 3

Die geprüften praxisrelevanten Verbindungen mit Traglasten zwischen ca. 700 und 1500 kN zeigten in Abhängigkeit der Anzahl der Schlitzbleche mehrheitlich ein deutlich duktilen Verhalten mit einem Duktilitätsmass D von 4 – 11. Bei dem in Abb. 105 (rechts) dargestellten Prüfkörper mit 3 Schlitzblechen sind die Ausbildungen der plastischen Fließgelenke der Stabdübel deutlich ersichtlich.

Für den Vergleich auf Bruchniveau sind die rechnerischen Traglasten auf das ursprüngliche Bemessungsmodell von Johansen (1949), detailliert in Blaß & Sandhaas (2016) beschrieben, zurückgeführt und ohne einen Einfluss von sicherheitsbasierten Beiwerten (z. B. k_a) nach (4)-(8) berechnet. Für die Lochleibungsfestigkeiten, die Berücksichtigung mehrerer in Krafrichtung hintereinander angeordneter stiftförmiger Verbindungsmittel sowie Einfluss der Holzdicken wurden im ersten Schritt die Angaben der SIA 265:2012 resp. Eurocode 5 verwendet. Ein reines Lochleibungsversagen ist mit den verwendeten Holzdicken ausgeschlossen.

$$M_{y,R,mean} = 0.3 f_{u,mean} d^{2.6} \quad (4)$$

$$f_{h,0,mean} = 0.082(1 - 0.01d) \rho_{mean} \quad (5)$$

$$f_{h,90,mean} = \frac{f_{h,0,mean}}{0.9 + 0.015d}$$

$$k_{red} = n^{-0.1} \sqrt[4]{\frac{a_1}{10d}} \frac{90^\circ - \alpha}{90^\circ} + \frac{\alpha}{90^\circ}; \quad k_{red} \leq 1$$

$$k_\beta \text{ Hilswert für Versagensmodus und Abminderung der Mindestdicken}, \quad n_{ef} = \begin{cases} n \\ n^{0.9} \sqrt[4]{\frac{a_1}{13d}} \end{cases} \quad (6)$$

$$R_{Verb,SIA} = (k_{red}) n_{tot} p k_\beta \sqrt{M_{u,mean} f_{h,mean} d} \quad (7)$$

$$R_{Verb,EC5} = (n_{ef}) \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,mean} t_1 d \\ f_{h,mean} t_1 d \left(\sqrt{2 + \frac{4M_{y,mean}}{f_{h,mean} d t_1^2}} - 1 \right) \\ 2,0 \sqrt{M_{y,mean} f_{h,mean} d} \end{array} \right. \quad (8)$$

Für die Materialparameter Rohdichte ρ_{mean} und Stahlzugfestigkeit $f_{u,mean}$ wurden die am verwendeten Material bestimmten Kennwerte verwendet. Die individuellen Rohdichten der Prüfkörper zu dessen spezifischen Holzfeuchtegehalt wurden für die Bemessung auf eine einheitliche Holzfeuchte von 12 % korrigiert. Da der Hauptteil der Vorversuchsserien aus zwei separaten Seitenhölzern aufgebaut wurde, ergaben sich bei 6 % der Versuchskörper Rohdichteunterschiede zwischen den beiden Teilen von mehr als 10 % der mittleren Rohdichte, siehe Abb. 125. Dennoch wurden diese aus den weiteren Vergleichen nicht eliminiert, da keine Korrelation der Rohdichten zu den erreichten Traglasten erkennbar ist, vgl. Abb. 126, und in der Praxis vorkommen kann.

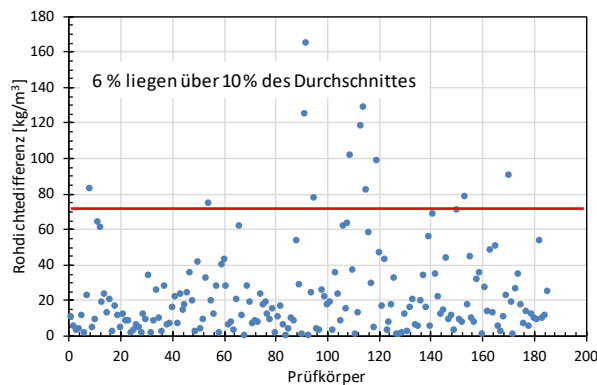


Abb. 125: Rohdichteunterschiede der Seitenhölzer

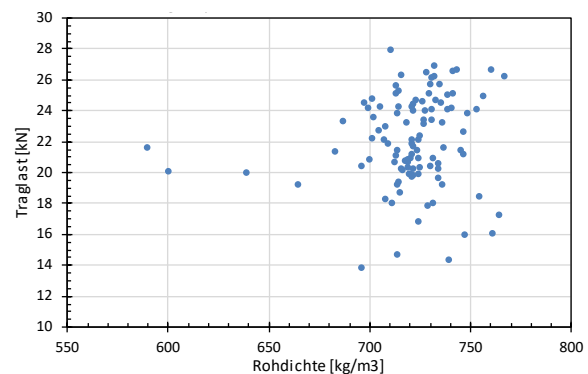


Abb. 126: Korrelation Traglast pro StD und Blech zur Rohdichte

6.4.2 Bemessung parallel zur Faser

Die erreichten maximalen Traglasten der parallel zur Faser geprüften Prüfkörper sind in den Diagrammen der Abb. 127 den rechnerischen Traglasten lt. SIA 265:2012 und Eurocode 5, Formeln (4)-(8), gegenübergestellt. Es zeigt sich eine sehr gute lineare Abhängigkeit und eine sehr hohe Korrelation zu den errechneten Traglasten, allerdings schätzt das aktuelle Bemessungskonzept die Traglasten nur zu 56 % bzw. 68 % ab. Zur Anpassung des Bemessungskonzeptes und Verbesserung der Abschätzung wurden nachfolgend dargelegte Schritte vorgenommen.

- Anwendung der Lochleibungswerte nach Ehlbeck & Werner (1992), siehe Abb. 128
- Anwendung des Seileffektes für Versagensmodi 3 der Johansen-Flie遝gelenk-Theorie, Gleichung 8c, Abb. 129

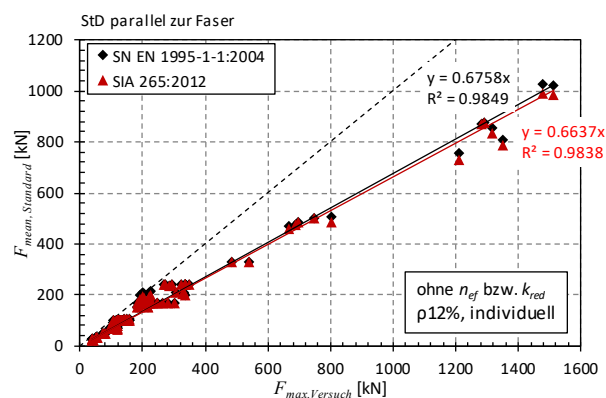
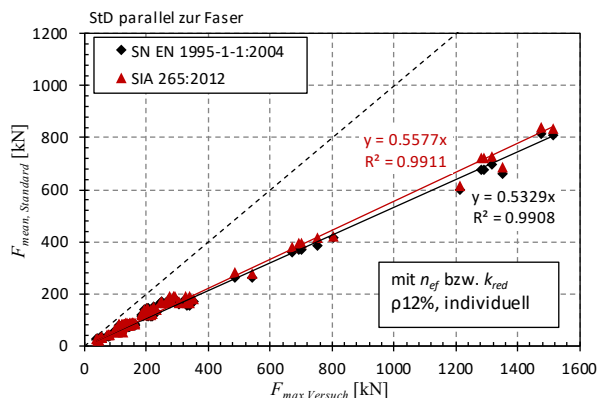


Abb. 127: Gegenüberstellung der erreichten Traglasten mit den prognostizierten des Bemessungskonzeptes

Anpassung Lochleibung nach Ehlbeck & Werner (1992), (max. Werte aus Abb. 123)

$$f_{h,mean} = 0,102(1 - 0,01d)\rho_{mean}$$

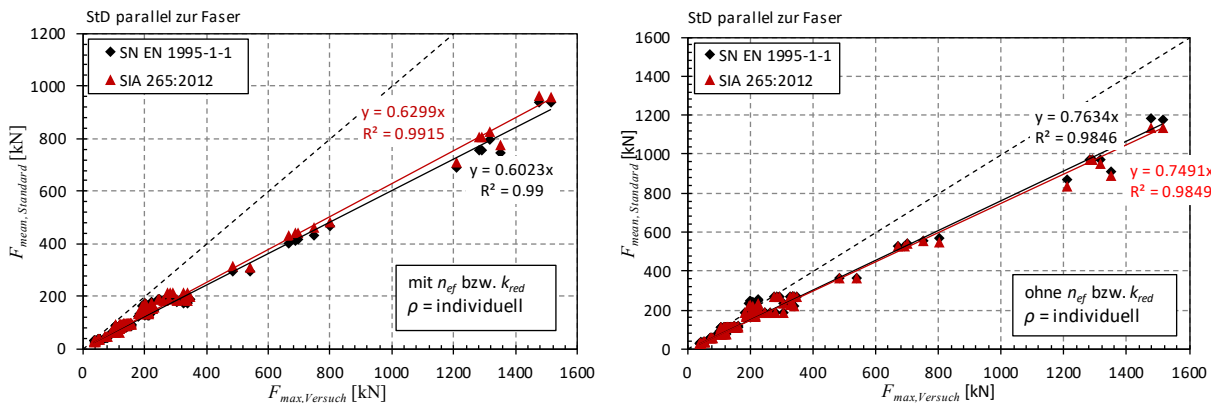


Abb. 128: Gegenüberstellung der erreichten Traglasten mit den prognostizierten des angepassten Bemessungskonzepts mit hohen Lochleibungsfestigkeiten

Anwendung Seileffekt mit 20 % der Traglast Modus 3 nach der Johansen-Fließgelenk-Theorie

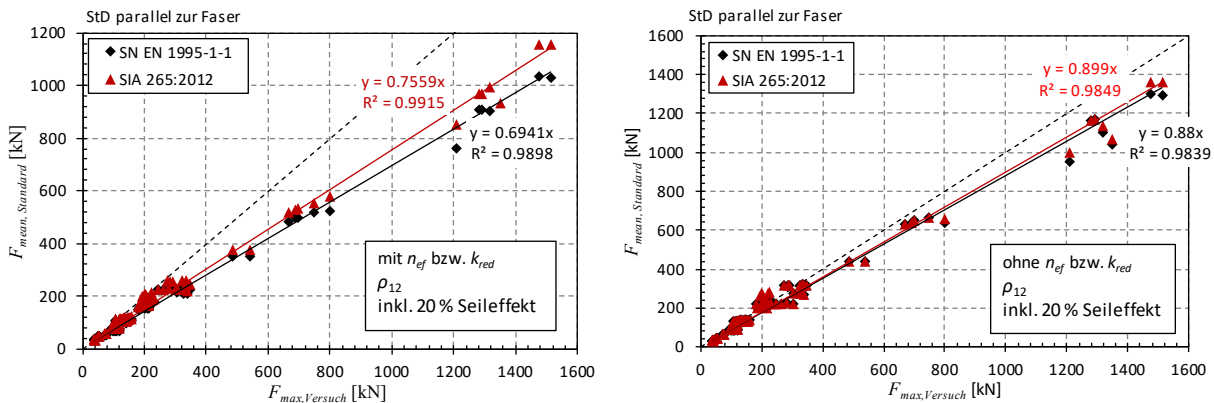


Abb. 129: Gegenüberstellung der erreichten Traglasten mit den prognostizierten des angepassten Bemessungskonzepts inkl. 20 % Seileffekt

Die Gegenüberstellungen der Traglasten zum Bemessungskonzept erfolgten zum einen unter Berücksichtigung der Abminderung der Anzahl hintereinander angeordneter Verbindungsmittel und zum anderen ohne. Generell ergibt sich eine geringfügig bessere Korrelation zur linearen Abhängigkeit bei Anwendung der Abminderungsfaktoren n_{ef} bzw. k_{red} , jedoch verbunden mit einer geringeren Abschätzung der Tragfähigkeit. Unter Anwendung der höheren Festigkeit und eines Anteiles aus dem Seileffekt mit 20 % können die Traglasten bis zu 79 % Niveau abgeschätzt werden.

Zur einfacheren Anwendung und im Hinblick auf das erreichte duktile Verhalten wird als Bemessungskonzept daher die Abschätzung unter Anwendung des Seileffektes für Versagensmodi 3 der Johansen-Fließgelenk-Theorie, Gleichung 8c, Abb. 129 vorgeschlagen.

6.4.3 Bemessung senkrecht zur Faser

Für die Versuche unter Belastung senkrecht zur Faser ergeben sich geringere Korrelationen der linearen Abhängigkeit der Prognose zu den erreichten Traglasten. Dies ist zurückzuführen darauf, dass in den aktuellen Bemessungsmethoden nicht alle Layoutparameter der Verbindung, die die Tragfähigkeit beeinflussen, berücksichtigt werden. Dies ist vor allem an den Ergebnissen auf dem Niveau von ca. 100 kN erkennbar, siehe Abb. 130. Auch hier zeigt die Norm Überschätzungen der Traglasten. Dies ist aber auf das Versagensverhalten durch ein Quersugsversagen zurückzuführen, welches hier noch nicht berücksichtigt wurde. Sehr deutlich zeigt sich der Unterschied der beiden Versagensarten durch Quersug (obere Hälfte) und Verbindungsmittel (untere Hälfte).

Im Weiteren werden daher die Daten getrennt betrachtet, um beide Bemessungsmodelle zu bewerten. Beide liegen jedoch in der Prognose tiefer als die Traglasten aus den Versuchen.

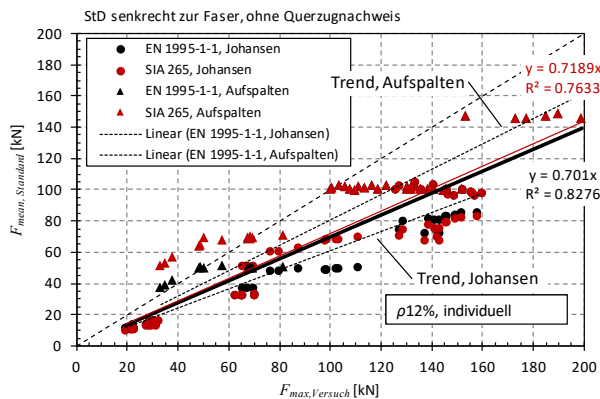


Abb. 130: Gegenüberstellung der erreichten Traglasten mit den prognostizierten des Bemessungskonzepts ohne und mit Berücksichtigung des Quersugversagens

Die Bemessung ergibt damit eine Abschätzung von 66 %. Für das Versagen des Verbindungsmittels entsprechend des Johansen-Modells wurden die gleichen Anpassungen wie parallel zur Faser vorgenommen. Mit Berücksichtigung der höheren Lochleibungsfestigkeit und 20 % Seileffekt für Modus 3 Versagen ergibt sich eine Abschätzung bis 83 %, siehe Abb. 131 links. Für den Quersugnachweis wurden das Modell der DIN 1052:2004 und der prSIA265 mit einer mittleren Quersugfestigkeit von 1.5 N/mm² bzw. $C_1 = 24 \text{ N/mm}^{1.5}$ angewandt, womit sich eine Abschätzung von ca. 100 % ergibt.

Anpassung Lochleibung nach Ehlbeck & Werner (1992), vgl. Abb. 123

$$f_{h,mean} = 0,102(1 - 0,016d)\rho_{mean}$$

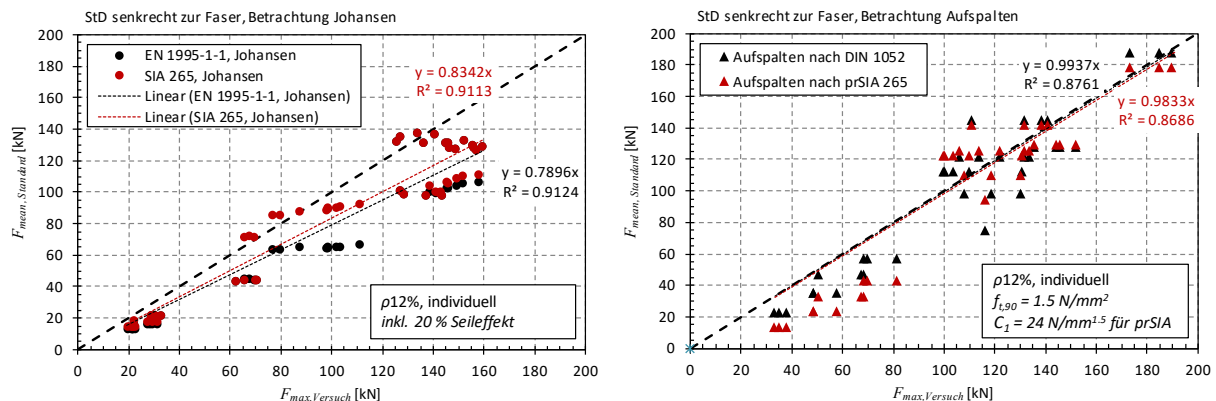


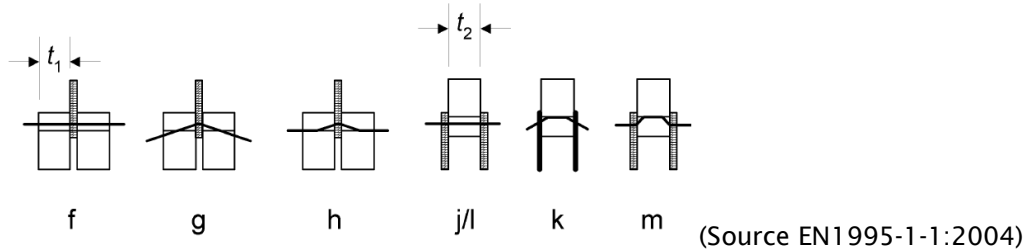
Abb. 131: Gegenüberstellung der erreichten Traglasten mit den prognostizierten des angepassten Bemessungskonzepts mit hohen Lochleibungsfestigkeiten und 20 % Seileffekt

6.4.4 Bemessungskonzept auf Design Niveau

Unter Anwendung des Anteiles der Seilwirkung und Rückführung auf das charakteristische Bemessungsniveau ergeben sich folgende Empfehlung zur Bemessung von Verbindungen in Buchenholz. Hierbei sind die charakteristischen Materialkennwerte der Materialien anzuwenden. Alle weiteren Beiwerte zur Bestimmung der Bemessungsfestigkeiten/-tragfähigkeiten sind analog der gültigen Normen anzuwenden.

Nach EC5 – EN1995-1-1:2004

Für die nachfolgend dargestellten Verbindungstypen ergeben sich folgende Bemessungsformeln. Der Anteil des Seileffektes ist direkt bei den Versagensfällen Ausbildung zweier Fließgelenke berücksichtigt unabhängig der Anzahl der Schlitzbleche. Ob dies auch bei Verbindungen mit einem Schlitzblech angesetzt werden darf ist ein offener Diskussionspunkt.



$$M_{y,Rk} = 0.3 f_u d^{2.6} \quad (9)$$

$$f_{h,0,k} = 0.102(1 - 0.01d) \rho_k \quad (10)$$

$$f_{h,90,k} = 0.102(1 - 0.016d) \rho_k$$

$$R_{v,Rk,(EC5)} = \min \begin{cases} f_{h,k} t_1 d \\ f_{h,k} t_1 d \left(\sqrt{2 + \frac{4M_{y,Rk}}{f_{h,k} d t_1^2}} - 1 \right) \\ 1, 2 \cdot 2, 3 \sqrt{M_{y,Rk} f_{h,k} d} \end{cases} \quad (11)$$

Nach SIA 256:2012

Beim Nachweis der Tragfähigkeit der Verbindungen nach SIA muss der Anteil der Seilwirkung bei dem Abminderungsfaktor k_β berücksichtigt werden.

$$M_{u,k} = 0.3 f_u d^{2.6} \quad (12)$$

$$f_{h,0,k} = 0.102(1 - 0.01d) \rho_k \quad (13)$$

$$f_{h,90,k} = 0.102(1 - 0.016d) \rho_k$$

$$k_\beta \quad \begin{array}{l} \text{Hilfswert für Versagensmodus und Abminderung der Mindestholzdicken} \\ \text{Erhöhung von } k_{\beta 1,2} \text{ um 20 \% für Berücksichtigung des Seileffektes} \end{array} \quad (14)$$

$$R_{v,Rk,(SIA)} = k_\alpha n_{tot} p k_\beta \sqrt{M_{u,k} f_{h,k} d} \quad (15)$$

Für Verbindungen die senkrecht zur Faser beansprucht werden, treten örtlich höhere Querspannungen auf, die mit dem Nachweis der Verbindungsmittel nicht erfasst werden, prSIA 265:2018-10. Für Verbindungen senkrecht zur Faser mit einem Verhältnis $a/h \leq 0.7$ sind in der Regel konstruktive Verstärkungsmassnahmen auszuführen, prSIA 265:2018-10. Respektive Querschlüsse mit einem Verhältnis $a_r/h > 1$ und $F_{90,d} > 0.5 R_{90,d}$ sind nach DIN 1052:2008 zu verstärken. Unverstärkte Querschlüsse mit $a/h \leq 0.7$ sind ausschliesslich in Feuchtekategorie 1 und 2 unter Einhaltung der zulässigen Abweichungen der Holzfeuchte beim Abbund vom zu erwartenden Mittelwert der Ausgleichsfeuchte zulässig, prSIA 265:2018-10. Für den Tragsicherheitsnachweis wird das Bemessungskonzept der DIN 1052:2008 oder das genauere Verfahren nach prSIA 265:2018-10 vorgeschlagen.

Hierbei sind $F_{90,d}$ der Bemessungswert der Kraftkomponente rechtwinklig zur Faserrichtung und $R_{90,d}$ der Bemessungswert der Tragfähigkeit des Bauteils zu bestimmen. Die Gleichungen (16) bis (22) und Abb. 132 beschreiben das Verfahren nach DIN 1052:2008 und Gleichung (23) bis (25) und Abb. 133 bis Abb. 135 das genauere Verfahren nach prSIA 265:2018-10. Für Stabdübelverbindungen wurde in der prSIA 265:2018-10 für die effektive Breite $b_{ef} = b$ verwendet.

$$R_{90,k} = k_s \cdot k_r \cdot \left(6.5 + \frac{18a^2}{h^2} \right) \cdot (t_{ef} \cdot h)^{0.8} \cdot f_{t,90,k} \quad (16)$$

mit

$$k_s = \max \left\{ t; 0.7 + \frac{1.4a_r}{h} \right\} \quad (17)$$

$$k_r = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{h_i}{h} \right)^2} \quad (18)$$

Für beidseitig und mittige Queranschlüsse gilt für die wirksame Anslusstiefe t_{ef} :

$$t_{ef} = \min \{ b; 2t; 24d \} \quad \begin{array}{l} \text{für Holz-Holz oder Holzwerkstoff-Holz-Verbindungen} \\ \text{mit Nägeln oder Holzschrauben} \end{array} \quad (19)$$

$$t_{ef} = \min \{ b; 2t; 30d \} \quad \text{für Stahlblech-Holz-Nagelverbindungen} \quad (20)$$

$$t_{ef} = \min \{ b; 2t; 12d \} \quad \text{für Stabdübel- und Bolzenverbindungen} \quad (21)$$

$$t_{ef} = \min \{ b; 2t; 12d \} \quad \text{für Verbindungen mit eingeklebten Stahlstäben} \quad (22)$$

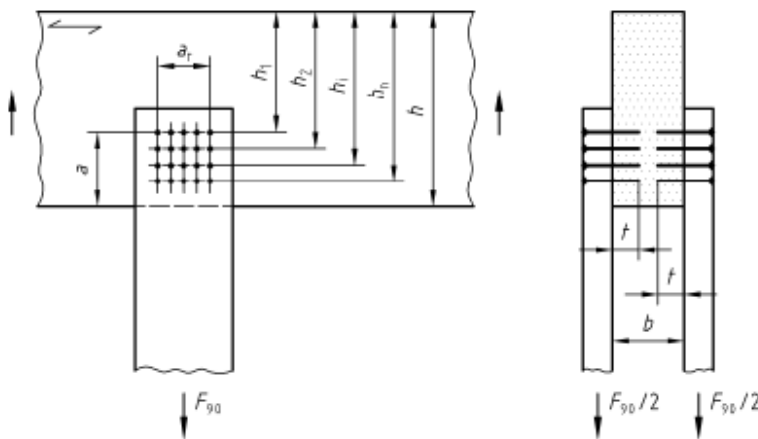


Abb. 132: Definition der Abstände am Queranschluss nach DIN 1052:2008

$$R_{t,90,d} = 11.7 \frac{\text{N}}{\text{mm}^{1.5}} \cdot b_{ef} \cdot \sqrt{\frac{a}{1 - \left(\frac{a}{h} \right)^3}} \cdot k_{ar} \cdot k_{hm} \quad (23)$$

mit

$$k_{ar} = \min \left\{ 1 + 0.75 \left(\frac{a_r}{h} \right); 2 \right\} \quad (24)$$

$$k_{hm} = 1 + 1.75 \frac{nh_m/1000}{1 + nh_m/1000} \quad (25)$$

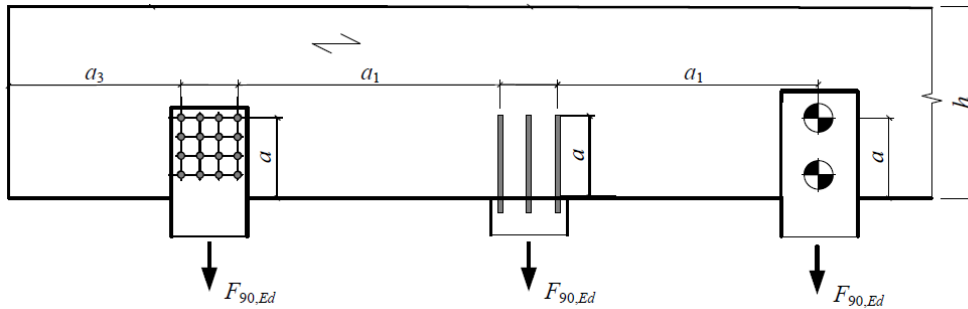


Abb. 133: Definition der Lage und Abmessung der Queranschlüsse, prSIA 265:2018-10

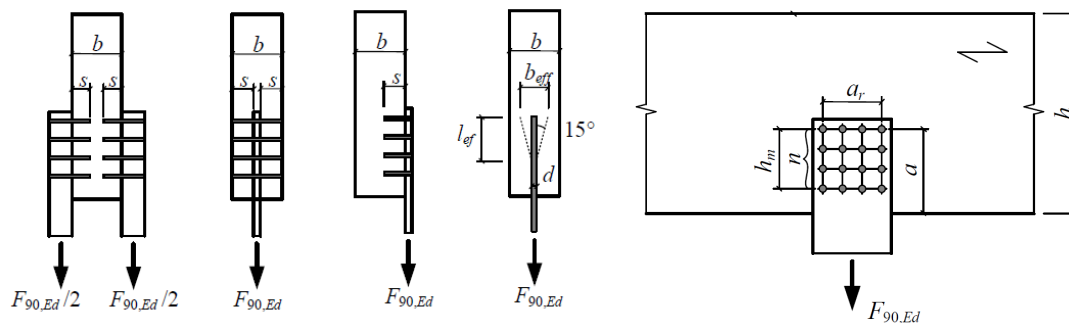


Abb. 134: Bezeichnungen bei beidseitigen, mittigen und einseitigem Queranschluss, prSIA 265:2018-10

Abb. 135: Bezeichnung der Abmessungen eines Queranschlusses, prSIA 265:2018-10

Gegenüberstellung

Für die Nutzungsklasse 1 und eine mittlere Lasteinwirkungsdauer ($k_{mod} = 0.8$) bzw. $\eta_w = 1.0$ und $\eta_t = 1.0$ ergeben sich Bemessungstraglasten für das Versagen des Verbindungsmittels parallel zur Faser von 51 - 56 % (Abb. 136) und senkrecht zur Faser von 47 - 54 % der im Versuch erreichten Traglasten, siehe Abb. 137 links. Die Bemessungslasten des Versagens Aufspalten unter Verwendung von Bemessungsfestigkeiten unterscheiden sich deutlich. Durch die geringe Querzugfestigkeit von $0.5 \cdot 0.8 / 1.3 = 0.3 \text{ N/mm}^2$ für den Nachweis nach DIN 1052 ergeben sich nur 20 % bzw. mit $C_{1,d} = 11.7 \text{ N/mm}^{1.5}$ für den Nachweis nach prSIA 256 ein Niveau von 48 %. Der Parameter c_{1d} wurde aus dem in Abb. 131 ermittelten Wert von $C_{1,Bruch} = 24 \text{ N/mm}^{1.5}$ (für Buche) auf den Wert für Fichte $C_{1,Bruch} = 17.3 \text{ N/mm}^{1.5}$ hochgerechnet ($24.0 / 17.3 \cdot 8.4 = 11.7$). Der Bruchwert für Fichte wurde vom Bemessungswert mit $8.4 / 0.73 \cdot 1.5 = 17.3$ berechnet.

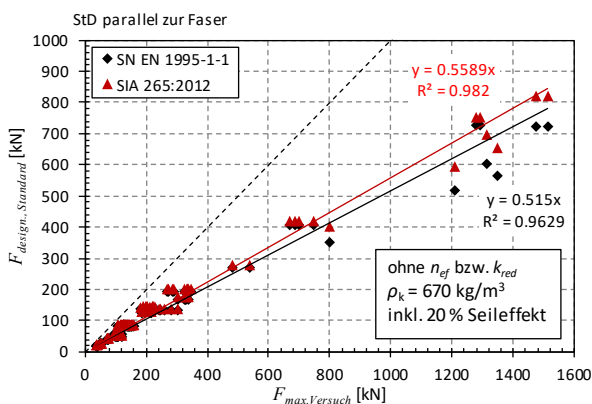


Abb. 136: Bemessungstraglasten parallel zur Faser mit dem angepassten Bemessungskonzepts inkl. 20 % Seileffekt

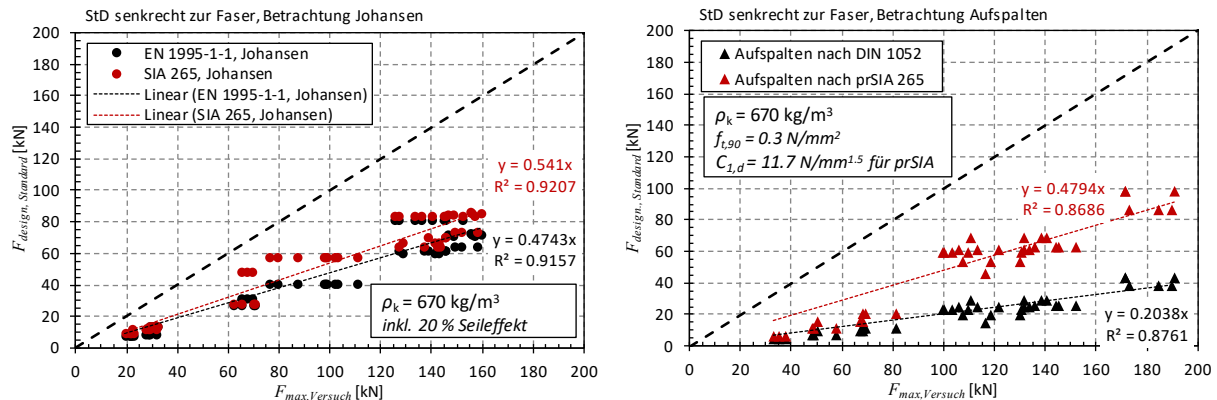


Abb. 137: Bemessungstraglasten senkrecht zur Faser mit den angepassten Bemessungskonzepten

6.4.5 Einfluss unterschiedlicher Holzfeuchten

Zusätzlich zu dem vorgestellten Prüfserien sind noch Prüfungen basierend auf der Prüferserie Nr. 19 für parallel zur Faser beanspruchte und Nr. 55 für senkrecht zur Faser beanspruchte Verbindungen aus dem Vorversuchsprogramm zur Bewertung des Einflusses der Holzfeuchte durchgeführt worden. Die Verbindungen der Prüfserien Nr. 128 und Nr. 168 sind abgetrocknet auf einem mittleren Holzfeuchtegehalt von 8 % und die Prüfserien Nr. 129 und Nr. 169 aufgefuehrt auf einen mittleren Holzfeuchtegehalt von 14 %, vgl. Tab. 15 und Tab. 16.

Tab. 15 Prüfprogramm, Stabdübelverbindungen parallel zur Faser, besondere Konditionen

Nr.-PK	Anzahl VM		d [mm]	Anzahl Bleche/Dicke	t_1 [mm]	t_2 [mm]	Verbindungsmittelabstände				Anzahl	b/h [mm]
	$m \times n$						a_1	a_2	a_3	a_4		
125	2x3		8	1/8 mm	50	-	7d	3d	7d	3d	3	108/72
128	2x3		8	1/8 mm	50	-	7d	3d	7d	3d	3	108/72
129	2x3		8	1/8 mm	50	-	7d	3d	7d	3d	3	108/72

Tab. 16 Prüfprogramm, Stabdübelverbindungen senkrecht zur Faser, besondere Konditionen

Nr.-PK	Anzahl VM		d [mm]	Anzahl Bleche/Dicke	t_1 [mm]	t_2 [mm]	Verbindungsmittelabstände				Anzahl	b/h [mm]
	$m \times n$						a_1	a_2	a_3	a_4		
168	3x2		8	1/8 mm	50	-	5d	3d	$\geq 4d$	-	3	108/108
169	3x2		8	1/8 mm	50	-	5d	3d	$\geq 4d$	-	3	108/108

Die Versuche werden anhand des Auswertungsschemas im Abschnitt 4.4 anhand der maximalen Tragfähigkeit ausgewertet. Die Traglasten pro Verbindungsmittel und pro Verbindungsmittel pro Scherfuge sind in Abb. 138 dargestellt. Die ersten Ergebnisse zu den Versuchsserien unter Variation der Holzfeuchte zeigen für parallel zur Faser beanspruchte Verbindungen eine Erhöhung der Traglast und Duktilität für höhere Holzfeuchten. Senkrecht zur Faser beanspruchte Verbindungen zeigen nach dem Abtrocknen und Aufuehrt höhere Traglasten und höhere Duktilitäten. Allerdings ist anzumerken, dass die Serie 55 nach den ersten Rissen infolge Querkzugversagen beendet wurde. Eine Weiterbelastung hätte durchaus Traglasten im gleichen Bereich zeigen können und somit auch grössere Duktilitäten ergeben.

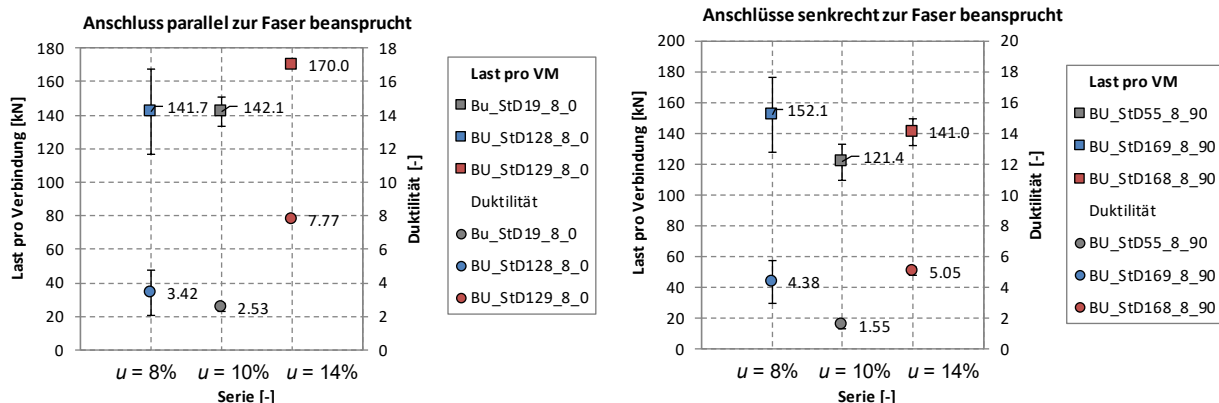


Abb. 138: Traglasten pro Verbindung für parallel zur Faser (links) und senkrecht zur Faser (rechts) unter Variation der Holzfeuchte

6.4.6 Einfluss Exzentrizität

Für die Dimensionierung von z. B. Fachwerkträgern wo durch Zwängungen, Exzentrizitäten oder realen Teileinspannungen innerhalb der Verbindungen Biegemomente entstehen ist eine Reduktion der Tragfähigkeit zu erwarten, vgl. Steurer (1981) sowie Abb. 139. Im angegebenen praktischen Bereich von ca. 6 mm Exzentrizität (entspricht 7.5 % bezogen auf den Querschnittsbreite von 80 mm) zeigen sich Abminderungen von 10 %. Bei 15 mm Exzentrizität (18.75 % bezogen auf Querschnittsbreite) ergeben sich bis zu ca. 20 % Abminderung. In der aktuellen Norm ist dies bei Anwendung der vereinfachten Bemessung durch eine Abminderungen der Tragfähigkeit der Anschlüsse von 25 % zu berücksichtigen.

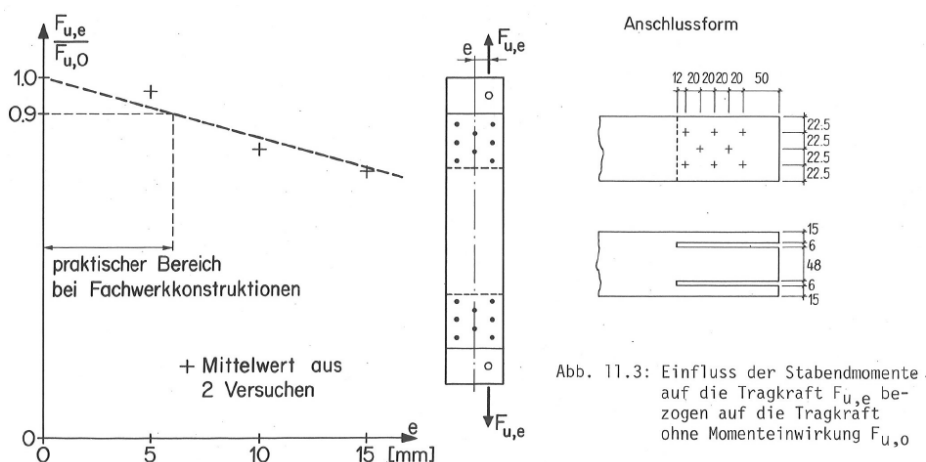


Abb. 11.3: Einfluss der Stabendmomente auf die Tragkraft $F_{u,e}$ bezogen auf die Tragkraft ohne Momenteinwirkung $F_{u,0}$

Abb. 139: Einfluss von Stabendmomenten auf die Tragfähigkeit, Steurer (1981)

Zur Bewertung der Exzentrizität bei den Buchenverbindungen mit Stabdübeln wurden an Verbindungen mit 3x2 Stabdübeln (Grundlage Prüfsreihe Nr. 19) Versuche mit 16 mm Exzentrizität durchgeführt, vgl. Tab. 15. Bei einer Versuchskörperbreite von 72 mm entspricht dies einem Verhältnis von 22 % welches weit über dem wie oben angegebenen praktischen Bereich liegt. Die Versuche wurden anhand des Auswertungsschemas im Abschnitt 4.4 anhand der maximalen Tragfähigkeit ausgewertet. Die angegebenen Last-Verschiebungskurven in Abb. 141 zeigen das Tragverhalten der einzelnen Prüfkörper. Die Traglasten pro Verbindung sind in Abb. 140 dargestellt. Die Versuche versagten zwar durch Aufspalten, was zu einer grösseren Streuung führt, allerdings wurde das gleiche Niveau der Tragfähigkeit wie bei Versuchen ohne Exzentrizität erreicht, Abb. 140.

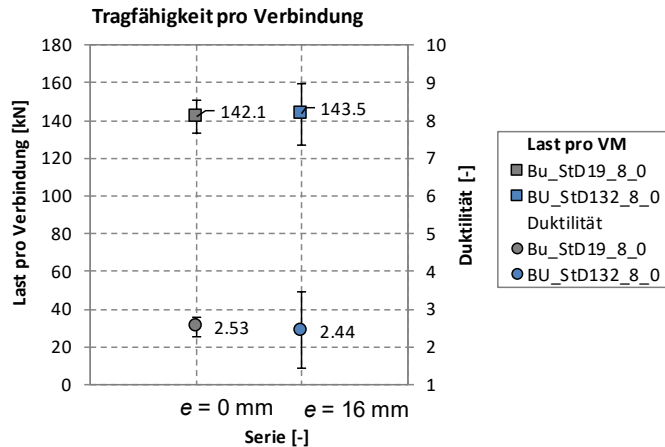


Abb. 140: Versuchsergebnisse mit exzentrischen Verbindungen

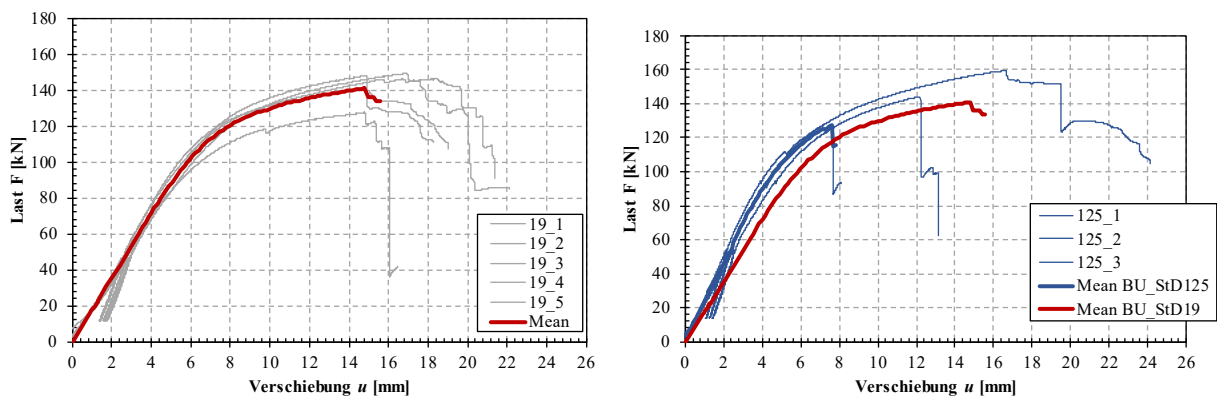


Abb. 141: Lastverschiebungskurven für die Prüfserie Nr. 19 ohne Exzentrizität (links) und Prüfserie Nr. 125 mit exzentrischer Belastung (rechts)

7 Zusammenfassung

Das durchgeführte Prüfprogramm liefert einen umfassenden Überblick zu den Einflüssen auf das Tragverhalten von Verbindungen mit Stabdübeln. Die Effekte der Rand- und Verbindungsmittelabstände, die Seiten- und Mittelholzdicken wie auch die Anzahl der Verbindungsmittel in und senkrecht zur Krafrichtung und Variation der Durchmesser wurden untersucht.

Basierend auf den Ergebnissen und anerkannten Bemessungsmethoden konnten für die Abschätzung der Tragsicherheit von Verbindungen mit Stabdübeln in Buche Empfehlungen erarbeitet werden. Es sind die Einbringvoraussetzungen, die Mindestrand- und Verbindungsmittelabstände geregelt wurden. Es wurden in ersten Ansätzen der Einfluss der Holzfeuchte und mögliche Exzentrizität geprüft. Für eine Absicherung der Empfehlungen sollten spezifisch ausgewählte Verbindungen im Grossformat weiterführend geprüft werden.

Die Prüfungen und Ergebnisse sind in einem sehr dynamischen Prozess aber mit bestem Wissen des Standes der Technik durchgeführt und ausgewertet wurden. Vielen Dank an alle Beteiligten.

8 Literaturverzeichnis

- DIN 1052:2008 Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin
- Ehlbeck J., Werner H. (1992) Softwood and Hardwood Embedding Strength for dowel-type fasteners. In: Proceedings CIB-W18, Åhus, Sweden, Paper 25-7-2.
- Ehlbeck J., Werner H. (1992a) Tragfähigkeit von Laubholzverbindungen mit stabförmigen Verbindungsmitteln. Technical Report. Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Universität Karlsruhe
- Ehrhart T. (2019) Brettschichtholz aus Buche – Erweiterung der Möglichkeiten im modernen Holzbau In: SIA Dokumentation D 0259, Von der Forschung zur Praxis: Erweiterung der Möglichkeiten im modernen Holzbau, Schweizer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich
- Eid. Forschungsanstalt für Wald Schnee u. Landschaft (2018) Schweizerisches Landesforstinventar, 4. Landesforstinventar 2009 –2013, Switzerland
- Franke B., Quenneville P. (2013) Design Approach for the Splitting Failure of Dowel-type Connections Loaded Perpendicular to Grain, In: Proceedings CIB-W18, Vancouver, Canada, Paper 46-7-6
- Franke S., Franke, B. (2019) Brettschichtholz aus Buche – Leistungsfähige Verbindungen, n: In: SIA Dokumentation D 0259, Von der Forschung zur Praxis: Erweiterung der Möglichkeiten im modernen Holzbau, Schweizer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich
- Franke S., Franke B. (2018) Fundamentals and recent strength results of connections in modern hardwood timber structures, Wood Material and Science Engineering, <https://doi.org/10.1080/17480272.2018.1526822>
- Franke S., Franke, B. (2018) Multiple steel dowel type connections in beech hardwood, WCTE 2018, Seoul, Republic of Korea
- FprEN 14358:2015 Holzbauwerke- Berechnung und Kontrolle charakteristischer Werte, Europäisches Komitee für Normung, Brüssel, 2015
- Gehri E. (2010) Screw connections in hardwood structures. In: 16. Internationales Holzbau-Forum, Garmisch Partenkirchen, Germany.
- Graffé C. (2019) High performance connections with dowel-type fasteners in beech laminated timber, Master Thesis, ETH Zürich
- Hübner U. (2013) Mechanische Kenngrößen von Buchen-, Eschen- und Robinienholz für lasttragende Bauteile. Thesis (PhD). Technische Universität Graz.
- ISO 10984-1:2009 Timber structures – Dowel Type fasteners, Part 1: Determination of yield moment, ISO, Genf, 2009
- Jockwer R. (2017) Tragverhalten und Bemessung von Queranschlüssen, In: SIA Dokumentation D 0259, Von der Forschung zur Praxis: neue Lösungen für den Holzbau, Schweizer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich
- Möller J.K. (2017) Beech wood joint with dowel type fasteners – High performance in modern timber structures, Master Thesis, ETH Zürich
- Mulenga C. (2017) Investigations on effective number of fasteners in multiple fastener steel to timber hardwood connections. Masterthesis, Berner Fachhochschule, Biel/Bienne
- Mulenga C. (2017) Load Carrying capacity of double shear steel to timber hardwood connections. Modulpaper, Berner Fachhochschule, Biel/Bienne
- Sandhaas C., Ravenshorst G.J.P., Blass H.J., van de Kuilen J.W.G. (2013) Embedment tests parallel-to-grain and ductility aspects using various wood species. Eur. J. Wood Prod. 71, 599–608.

- SIA 265:2012 Holzbau, Schweizer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich
- SIA 265/1:2018 Holzbau – Ergänzende Festlegungen, Schweizer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich
- SIA 265/1-C1:2009 Holzbau – Ergänzende Festlegungen – Korrigenda C1, Schweizer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich
- prSIA 265:2018-10 Holzbau, Entwurfsversion ohne Gültigkeit, Schweizer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich
- SN EN 383:2007 Holzbauwerke – Prüfverfahren – Bestimmung der Lochleibungsfestigkeit und Bettungswerte für stiftförmige Verbindungsmittel, Schweizer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich
- SN EN 409:2009 Holzbauwerke - Prüfverfahren-Bestimmung des Flieissmomentes von stiftförmigen Verbindungsmitteln, Schweizer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich
- SN EN 1380:2009 Holzbauwerke - Prüfverfahren-Tragende Verbindungen mit Nägeln, Schrauben, Stabdübeln und Bolzen, Schweizer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich
- SN EN 1995-1-1:2004 Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines, Schweizer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich
- SN EN 1995-1-1:2004/A1:2008 Änderung Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines, Schweizer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich
- SN EN 1995-1-1:2004/A2:2014 Änderung Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines, Schweizer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich
- SN EN 1995-1-1:2004/NA:2014 Nationaler Anhang Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines, Schweizer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich
- SN EN 26891:1991 Holzbauwerke - Verbindungen mit mechanischen Verbindungsmitteln-Allgemeine Grundsätze für die Ermittlung der Tragfähigkeit und des Verformungsverhaltens
- SN EN 28970:1991 Holzbauwerke – Prüfung von Verbindungen mit mechanischen Verbindungsmitteln, Anforderungen an die Rohdichte des Holzes, Schweizer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich
- Steurer A. (1981): Kapitel Fachwerke in Einführung in die Norm SIA 164, Autographie zum Fortbildungskurs für Bauingenieure, Publikation Nr. 81-1, ETH Zürich
- Whale L.R.J., Smith I., Hilson B.O. (1986) Behaviour of nailed and bolted joints under short-term lateral load – conclusions from some recent research. In: Proceedings of CIBW18, Bd. 1. Florence, Italy, Paper 19-7-1.
- Whale L.R.J., Smith I., Hilson B.O. (1987) Characteristic properties of nailed and bolted joints under short-term lateral load. Part 4 – The influence of testing mode and fastener diameter upon embedment test data. In: Journal of the Institute of Wood Science 11 (1987), Nr. 5, S. 156–161.
- Whale L.R.J., Smith I., Larsen H.J. (1987) Design of nailed and bolted joints – Proposal for the revision of existing formulae in draft Eurocode 5 and the CIB code. In: Proceedings of CIB-W18 Meeting, 20-7-1, Ireland.
- Zeiter L., (2018) Leistungsfähige Verbindungen in Buchen Brettschichtholz, Master Thesis, ETH Zürich

Inhaltsverzeichnis

Anhang A	Ergebnisse Einbringversuche für Stabdübel	71
A.1	Einbringkräfte einteilige Prüfkörper	71
A.2	Einbringkräfte zweiteilige Prüfkörper 4 und 5.....	73
Anhang B	Versuchsserien zu Anschlüssen	74
B.1	Kennwerte der Versuchsserien für parallel zur Faser beansprucht	74
B.2	Tragfähigkeiten und Steifigkeiten der Anschlüsse parallel zur Faser.....	76
B.3	Kennwerte zu den Versuchsserien senkrecht zur Faser	81
B.4	Tragfähigkeiten und Steifigkeiten zu Anschlüssen senkrecht zur Faser.....	82
B.5	Tragfähigkeiten und Steifigkeiten der Passbolzenversuche parallel zur Faser.....	88
B.6	Tragfähigkeiten und Steifigkeiten der Passbolzenversuche senkrecht zur Faser.....	88
Anhang C	Versagensbilder	89
C.1	Versuche parallel zur Faser – Stabdübel	89
C.2	Vorversuche rechtwinklig zur Faserrichtung	113

Anhang A Ergebnisse Einbringversuche für Stabdübel

A.1 Einbringkräfte einteilige Prüfkörper

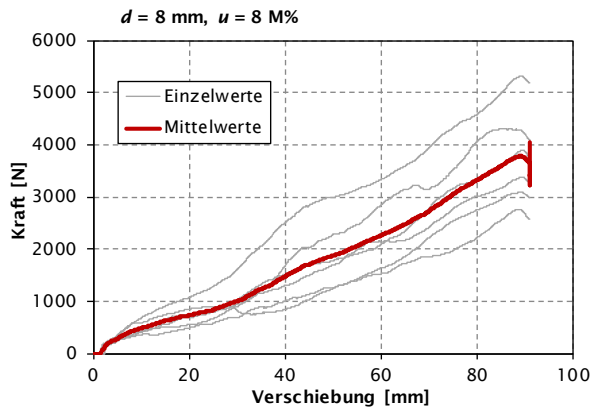


Abb. A-1: Bohrlochdurchmesser 8.0 mm und Holzfeuchte 8 M%

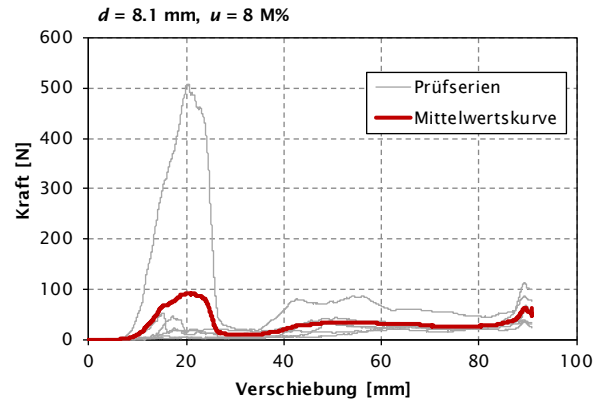


Abb. A-2: Bohrlochdurchmesser 8.1 mm und Holzfeuchte 8 M%

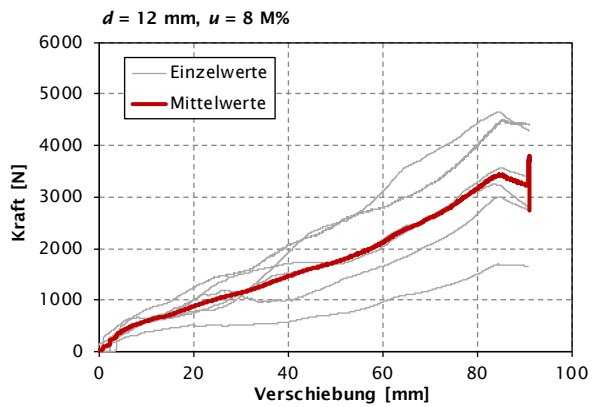


Abb. A-3: Bohrlochdurchmesser 12.0 mm und Holzfeuchte 8 M%

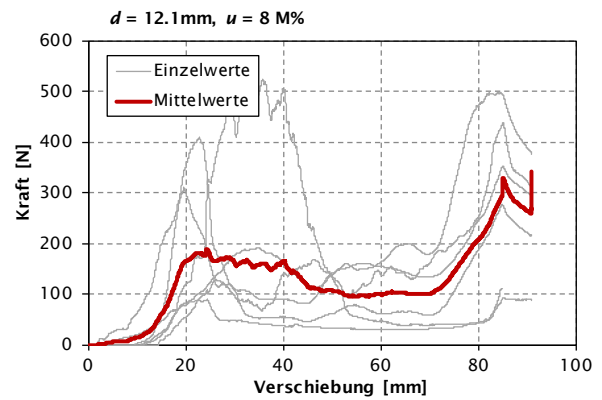


Abb. A-4: Bohrlochdurchmesser 12.1 mm und Holzfeuchte 8 M%

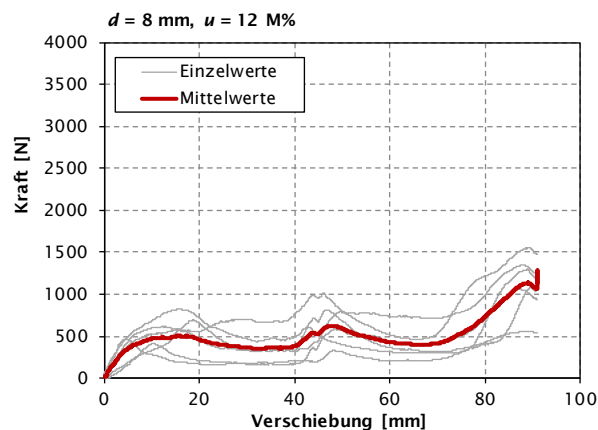


Abb. A-5: Bohrlochdurchmesser 8.0 mm und Holzfeuchte 12 M%

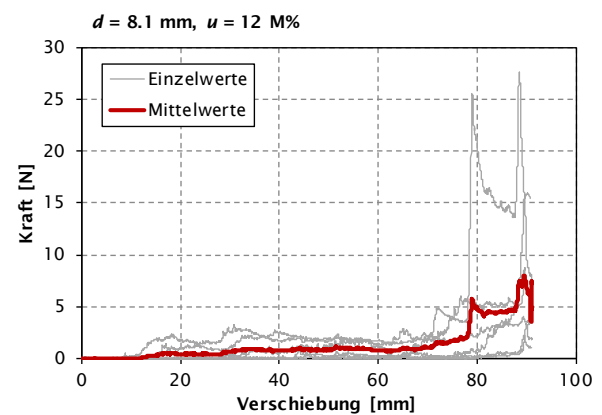


Abb. A-6: Bohrlochdurchmesser 8.1 mm und Holzfeuchte 12 M%

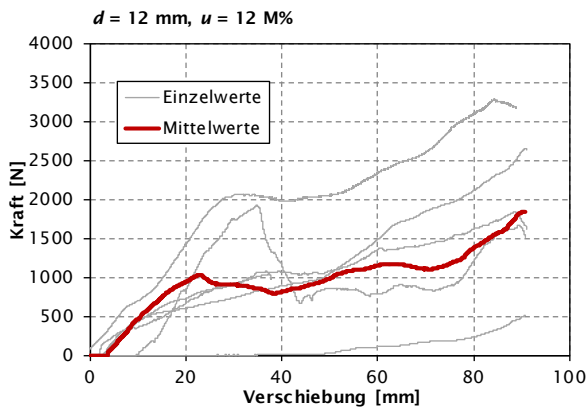


Abb. A-7: Bohrlochdurchmesser 12.0 mm und Holzfeuchte 12 M%

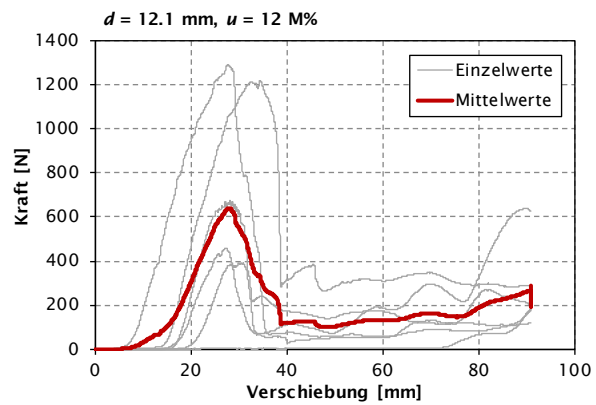


Abb. A-8: Bohrlochdurchmesser 12.1 mm und Holzfeuchte 12 M%

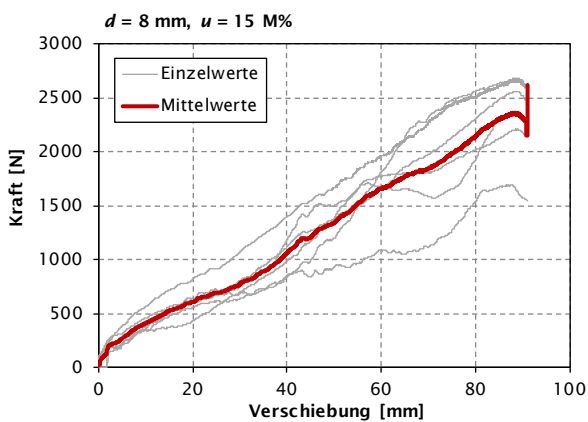


Abb. A-9: Bohrlochdurchmesser 8.0 mm und Holzfeuchte 15 M%

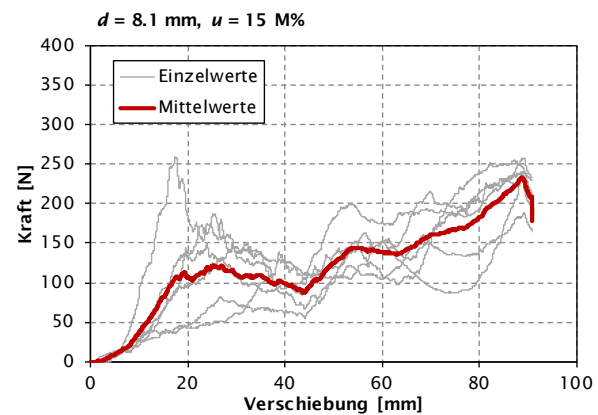


Abb. A-10: Bohrlochdurchmesser 8.1 mm und Holzfeuchte 15 M%

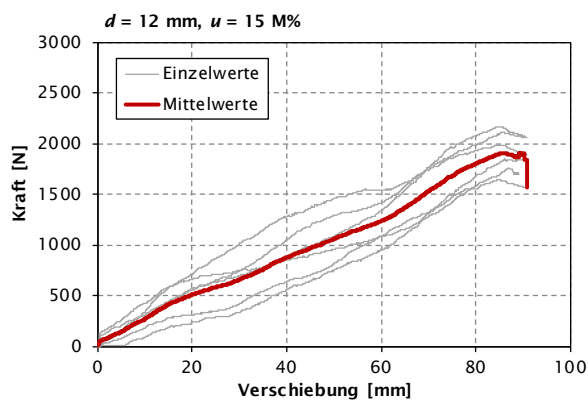


Abb. A-11: Bohrlochdurchmesser 12.0 mm und Holzfeuchte 15 M%

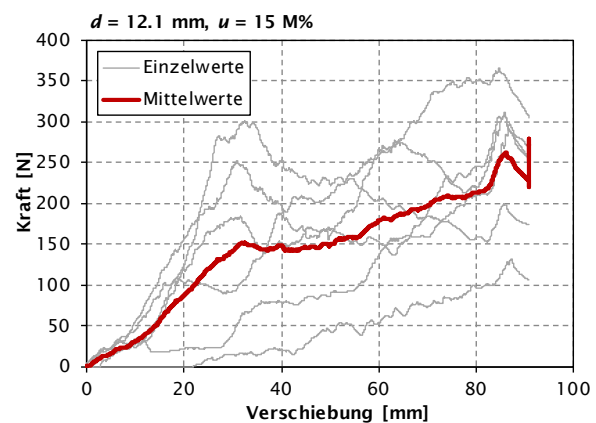
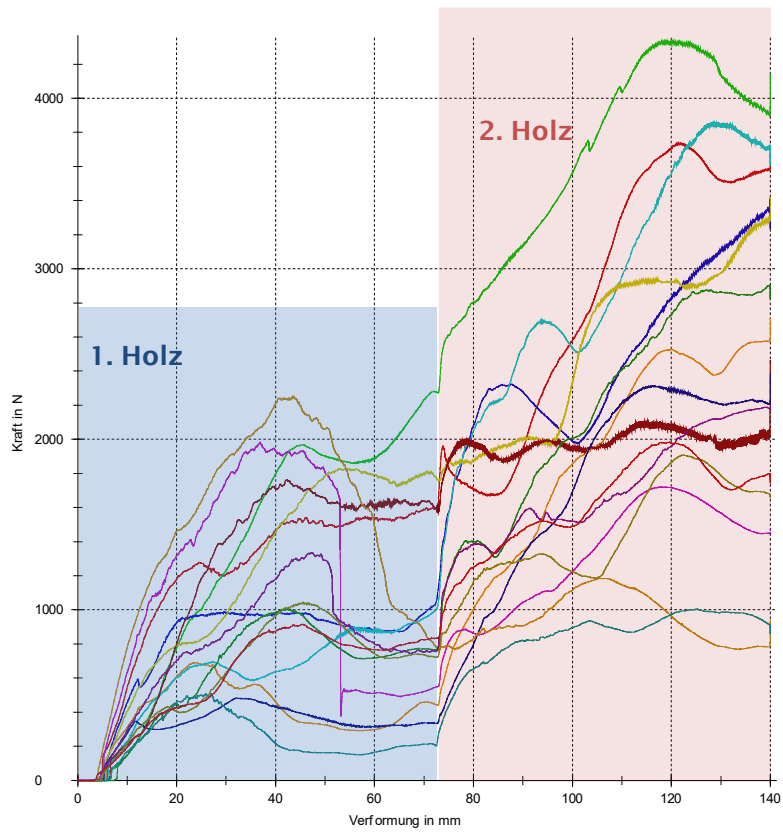


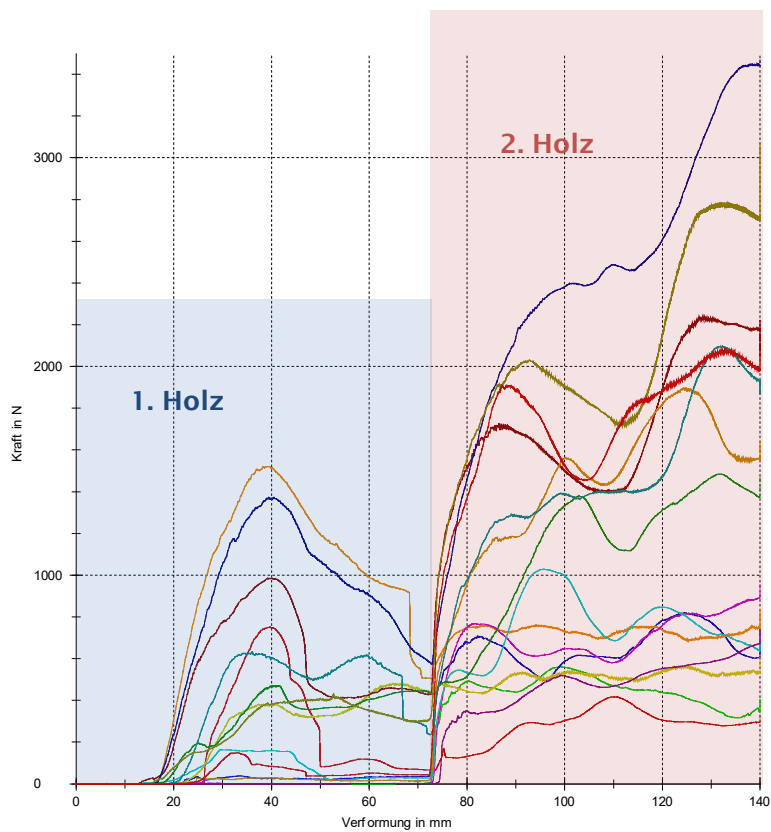
Abb. A-12: Bohrlochdurchmesser 12.1 mm und Holzfeuchte 15 M%

A.2 Einbringkräfte zweiteilige Prüfkörper 4 und 5

A.2.1 Einbringkräfte PK 4, Bohrlochdurchmesser 12.0 mm



A.2.2 Einbringkräfte PK 5, Bohrlochdurchmesser 12.1 mm



Anhang B Versuchsserien zu Anschlüssen

B.1 Kennwerte der Versuchsserien für parallel zur Faser beansprucht

	$\rho_{1,HF}$	$\rho_{2,HF}$	u	t_1	t_2	b	h	l	d	m	n	t_{Blech}	n_{Bleche}	a_1	a_2	a_3	a_4	h_e/h			
	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[M%]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]			[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]			
BU_StD18_8_0	699	709	9.3	50	0	108	72	544	8.0	2	3	8.0	1	9d	72	3d	24	7d	56	3d	24
	728	734	9.8	50	0	108	72	544	8.0	2	3	8.0	1	9d	72	3d	24	7d	56	3d	24
	715	712	10.0	50	0	108	72	544	8.0	2	3	8.0	1	9d	72	3d	24	7d	56	3d	24
	711	715	9.7	50	0	108	72	544	8.0	2	3	8.0	1	9d	72	3d	24	7d	56	3d	24
	749	738	9.2	50	0	108	72	544	8.0	2	3	8.0	1	9d	72	3d	24	7d	56	3d	24
Bu_StD19_8_0	726	728	9.5	50	0	108	72	448	8.0	2	3	8.0	1	7d	56	3d	24	7d	56	3d	24
	712	735	9.7	50	0	108	72	448	8.0	2	3	8.0	1	7d	56	3d	24	7d	56	3d	24
	798	715	9.3	50	0	108	72	448	8.0	2	3	8.0	1	7d	56	3d	24	7d	56	3d	24
	724	719	10.1	50	0	108	72	448	8.0	2	3	8.0	1	7d	56	3d	24	7d	56	3d	24
	678	688	9.9	50	0	108	72	448	8.0	2	3	8.0	1	7d	56	3d	24	7d	56	3d	24
BU_StD21_8_0	763	698	9.3	50	0	108	72	352	8.0	2	3	8.0	1	5d*	40	3d	24	7d	56	3d	24
	744	683	9.3	50	0	108	72	352	8.0	2	3	8.0	1	5d*	40	3d	24	7d	56	3d	24
	706	687	9.2	50	0	108	72	352	8.0	2	3	8.0	1	5d*	40	3d	24	7d	56	3d	24
	760	737	9.1	50	0	108	72	352	8.0	2	3	8.0	1	5d*	40	3d	24	7d	56	3d	24
	739	752	9.3	50	0	108	72	352	8.0	2	3	8.0	1	5d*	40	3d	24	7d	56	3d	24
BU_StD20_8_0	735	714	9.9	50	0	108	72	352	8.0	2	3	8.0	1	5d	40	3d	24	7d	56	3d	24
	720	723	9.4	50	0	108	72	352	8.0	2	3	8.0	1	5d	40	3d	24	7d	56	3d	24
	711	727	9.5	50	0	108	72	352	8.0	2	3	8.0	1	5d	40	3d	24	7d	56	3d	24
	723	712	9.3	50	0	108	72	352	8.0	2	3	8.0	1	5d	40	3d	24	7d	56	3d	24
BU_StD22_8_0	724	720	9.8	50	0	108	72	352	8.0	2	3	8.0	1	5d	40	3d	24	7d	56	3d	24
	695	708	10.1	50	0	108	48	448	8.0	1	3	8.0	1	7d	56	3d	24	7d	56	3d	24
	724	732	10.4	50	0	108	48	448	8.0	1	3	8.0	1	7d	56	3d	24	7d	56	3d	24
	734	726	9.9	50	0	108	48	448	8.0	1	3	8.0	1	7d	56	3d	24	7d	56	3d	24
	705	706	9.7	50	0	108	48	448	8.0	1	3	8.0	1	7d	56	3d	24	7d	56	3d	24
BU_StD23_8_0	695	699	10.2	50	0	108	48	448	8.0	1	3	8.0	1	7d	56	3d	24	7d	56	3d	24
	719	724	9.4	50	0	108	96	448	8.0	3	3	8.0	1	7d	56	3d	24	7d	56	3d	24
	715	710	10.8	50	0	108	96	448	8.0	3	3	8.0	1	7d	56	3d	24	7d	56	3d	24
	737	736	9.6	50	0	108	96	448	8.0	3	3	8.0	1	7d	56	3d	24	7d	56	3d	24
	721	734	9.6	50	0	108	96	448	8.0	3	3	8.0	1	7d	56	3d	24	7d	56	3d	24
BU_StD24_8_0	739	729	9.7	50	0	108	96	448	8.0	3	3	8.0	1	7d	56	3d	24	7d	56	3d	24
	717	751	9.4	50	0	108	64	448	8.0	2	3	8.0	1	7d	56	2d	16	7d	56	3d	24
	724	725	9.6	50	0	108	64	448	8.0	2	3	8.0	1	7d	56	2d	16	7d	56	3d	24
	725	717	9.3	50	0	108	64	448	8.0	2	3	8.0	1	7d	56	2d	16	7d	56	3d	24
	724	699	9.4	50	0	108	64	448	8.0	2	3	8.0	1	7d	56	2d	16	7d	56	3d	24
BU_StD26_8_0	724	715	9.2	50	0	108	64	448	8.0	2	3	8.0	1	7d	56	2d	16	7d	56	3d	24
	715	717	9.5	50	0	108	80	448	8.0	2	3	8.0	1	7d	56	4d	32	7d	56	3d	24
	707	734	9.7	50	0	108	80	448	8.0	2	3	8.0	1	7d	56	4d	32	7d	56	3d	24
	712	706	9.3	50	0	108	80	448	8.0	2	3	8.0	1	7d	56	4d	32	7d	56	3d	24
	735	728	10.0	50	0	108	80	448	8.0	2	3	8.0	1	7d	56	4d	32	7d	56	3d	24
BU_StD27_8_0	708	692	9.4	50	0	108	80	448	8.0	2	3	8.0	1	7d	56	4d	32	7d	56	3d	24
	691	713	10.1	50	0	108	72	480	8.0	2	3	8.0	1	7d	56	3d	24	9d	72	3d	24
	718	725	10.5	50	0	108	72	480	8.0	2	3	8.0	1	7d	56	3d	24	9d	72	3d	24
	688	712	10.3	50	0	108	72	480	8.0	2	3	8.0	1	7d	56	3d	24	9d	72	3d	24
	754	739	10.7	50	0	108	72	480	8.0	2	3	8.0	1	7d	56	3d	24	9d	72	3d	24
BU_StD29_8_0	727	744	10.4	50	0	108	72	480	8.0	2	3	8.0	1	7d	56	3d	24	9d	72	3d	24
	737	713	11.5	50	0	108	72	448	8.0	2	3	8.0	1	7d	56	3d	24	5d	40	3d	24
	738	703	10.0	50	0	108	72	448	8.0	2	3	8.0	1	7d	56	3d	24	5d	40	3d	24
	728	709	10.2	50	0	108	72	448	8.0	2	3	8.0	1	7d	56	3d	24	5d	40	3d	24
	722	720	10.8	50	0	108	72	448	8.0	2	3	8.0	1	7d	56	3d	24	5d	40	3d	24
BU_StD30_8_0	734	693	10.4	50	0	108	72	448	8.0	2	3	8.0	1	7d	56	3d	24	5d	40	3d	24
	728	724	10.0	50	0	108	72	416	8.0	2	3	8.0	1	7d	56	3d	24	5d*	40	3d	24
	765	756	10.0	50	0	108	72	416	8.0	2	3	8.0	1	7d	56	3d	24	5d*	40	3d	24
	757	725	9.9	50	0	108	72	416	8.0	2	3	8.0	1	7d	56	3d	24	5d*	40	3d	24
	752	677	10.0	50	0	108	72	416	8.0	2	3	8.0	1	7d	56	3d	24	5d*	40	3d	24
BU_StD31_8_0	690	709	10.2	50	0	108	72	416	8.0	2	3	8.0	1	7d	56	3d	24	5d*	40	3d	24
	726	738	9.2	50	0	108	72	224	8.0	2	1	8.0	1		3d	24	7d	56	3d	24	
	724	696	9.1	50	0	108	72	224	8.0	2	1	8.0	1		3d	24	7d	56	3d	24	
	733	732	9.3	50	0	108	72	224	8.0	2	1	8.0	1		3d	24	7d	56	3d	24	
	709	749	9.2	50	0	108	72	224	8.0	2	1	8.0	1		3d	24	7d	56	3d	24	
BU_StD33_8_0	720	763	9.2	50	0	108	72	224	8.0	2	1	8.0	1		3d	24	7d	56	3d	24	
	753	725	8.6	50	0	108	72	896	8.0	2	7	8.0	1	7d	56	3d	24	7d	56	3d	24
	739	733	8.7	50	0	108	72	896	8.0	2	7	8.0	1	7d	56	3d	24	7d	56	3d	24
	742	735	9.4	50	0	108	72	896	8.0	2	7	8.0	1	7d	56	3d	24	7d	56	3d	24
	752	754	8.5	50	0	108	72	896	8.0	2	7	8.0	1	7d	56	3d	24	7d	56	3d	24
	741	721	8.5	50	0	108	72	896	8.0	2	7	8.0	1	7d	56	3d	24	7d	56	3d	24

BU_StD34_8_0	798	736	9.7	50	0	108	72	400	8.0	2	2	8.0	1	9d	72	3d	24	7d	56	3d	24
	710	721	9.9	50	0	108	72	400	8.0	2	2	8.0	1	9d	72	3d	24	7d	56	3d	24
	733	733	9.6	50	0	108	72	400	8.0	2	2	8.0	1	9d	72	3d	24	7d	56	3d	24
	727	700	9.4	50	0	108	72	400	8.0	2	2	8.0	1	9d	72	3d	24	7d	56	3d	24
BU_StD35_8_0	750	731	9.6	50	0	108	72	400	8.0	2	2	8.0	1	9d	72	3d	24	7d	56	3d	24
	690	683	10.9	50	0	108	72	544	8.0	2	3	8.0	1	9d	72	3d	24	7d	56	3d	24
	710	718	10.3	50	0	108	72	544	8.0	2	3	8.0	1	9d	72	3d	24	7d	56	3d	24
	731	738	10.6	50	0	108	72	544	8.0	2	3	8.0	1	9d	72	3d	24	7d	56	3d	24
BU_StD36_8_0	712	736	10.5	50	0	108	72	544	8.0	2	3	8.0	1	9d	72	3d	24	7d	56	3d	24
	730	712	10.4	50	0	108	72	544	8.0	2	3	8.0	1	9d	72	3d	24	7d	56	3d	24
	724	705	9.6	50	0	108	72	832	8.0	2	5	8.0	1	9d	72	3d	24	7d	56	3d	24
	702	714	9.7	50	0	108	72	832	8.0	2	5	8.0	1	9d	72	3d	24	7d	56	3d	24
BU_StD37_8_0	697	706	8.9	50	0	108	72	832	8.0	2	5	8.0	1	9d	72	3d	24	7d	56	3d	24
	734	719	9.0	50	0	108	72	832	8.0	2	5	8.0	1	9d	72	3d	24	7d	56	3d	24
	708	706	8.5	50	0	108	72	832	8.0	2	5	8.0	1	9d	72	3d	24	7d	56	3d	24
	736	725	9.2	50	0	108	72	832	8.0	2	7	8.0	1	9d	72	3d	24	7d	56	3d	24
BU_StD39_8_0	732	749	8.6	50	0	108	72	832	8.0	2	7	8.0	1	9d	72	3d	24	7d	56	3d	24
	737	731	8.3	50	0	108	72	832	8.0	2	7	8.0	1	9d	72	3d	24	7d	56	3d	24
	736	736	8.8	50	0	108	72	832	8.0	2	7	8.0	1	9d	72	3d	24	7d	56	3d	24
	729	733	8.4	50	0	108	72	832	8.0	2	7	8.0	1	9d	72	3d	24	7d	56	3d	24
BU_StD45_8_0	728	719	9.3	50	0	108	72	352	8.0	2	5	8.0	1	5d*	40	3d	24	7d	56	3d	24
	703	712	10.2	50	0	108	72	352	8.0	2	5	8.0	1	5d*	40	3d	24	7d	56	3d	24
	698	752	9.2	50	0	108	72	352	8.0	2	5	8.0	1	5d*	40	3d	24	7d	56	3d	24
	732	761	9.9	50	0	108	72	352	8.0	2	5	8.0	1	5d*	40	3d	24	7d	56	3d	24
BU_StD47_8_0	722	722	9.2	50	0	108	72	352	8.0	2	5	8.0	1	5d*	40	3d	24	7d	56	3d	24
	816	692	11.2	20	0	48	72	448	8.0	2	3	8.0	1	7d	56	3d	24	7d	56	3d	24
	811	646	11.2	20	0	48	72	448	8.0	2	3	8.0	1	7d	56	3d	24	7d	56	3d	24
	717	717	11.2	20	0	48	72	448	8.0	2	3	8.0	1	7d	56	3d	24	7d	56	3d	24
BU_StD51_12_0	736	712	11.2	20	0	48	72	448	8.0	2	3	8.0	1	7d	56	3d	24	7d	56	3d	24
	803	726	11.1	20	0	48	72	448	8.0	2	3	8.0	1	7d	56	3d	24	7d	56	3d	24
	719	723	9.7	30	0	68	72	448	8.0	2	3	8.0	1	7d	56	3d	24	7d	56	3d	24
	721	718	9.8	30	0	68	72	448	8.0	2	3	8.0	1	7d	56	3d	24	7d	56	3d	24
BU_StD53_20_0	728	702	9.8	30	0	68	72	448	8.0	2	3	8.0	1	7d	56	3d	24	7d	56	3d	24
	726	705	9.7	30	0	68	72	448	8.0	2	3	8.0	1	7d	56	3d	24	7d	56	3d	24
	707	725	9.4	30	0	68	72	448	8.0	2	3	8.0	1	7d	56	3d	24	7d	56	3d	24
	748	729	11.6	70	0	148	108	672	12.0	2	3	8.0	1	7d	84	3d	36	7d	84	3d	36
BU_StD128_8_0	721	718	11.6	70	0	148	108	672	12.0	2	3	8.0	1	7d	84	3d	36	7d	84	3d	36
	717	752	11.5	70	0	148	108	672	12.0	2	3	8.0	1	7d	84	3d	36	7d	84	3d	36
	753	729	11.4	70	0	148	108	672	12.0	2	3	8.0	1	7d	84	3d	36	7d	84	3d	36
	696	688	11.6	70	0	148	108	672	12.0	2	3	8.0	1	7d	84	3d	36	7d	84	3d	36
BU_StD129_8_0	687	690	8.6	100	0	208	180	1120	20.0	2	3	8.0	1	7d	140	3d	60	7d	140	3d	60
	707	692	8.5	100	0	208	180	1120	20.0	2	3	8.0	1	7d	140	3d	60	7d	140	3d	60
	754	691	8.5	100	0	208	180	1120	20.0	2	3	8.0	1	7d	140	3d	60	7d	140	3d	60
	653	755	8.6	100	0	208	180	1120	20.0	2	3	8.0	1	7d	140	3d	60	7d	140	3d	60
BU_StD132_8_90	769	733	8.5	100	0	208	180	1120	20.0	2	3	8.0	1	7d	140	3d	60	7d	140	3d	60
	802	769	9.2	50	0	108	72	448	8.0	2	3	8.0	1	7d	56	3d	24	7d	56	3d	24
	746	753		50	0	108	72	448	8.0	2	3	8.0	1	7d	56	3d	24	7d	56	3d	24
	787	780	7.6	50	0	108	72	448	8.0	2	3	8.0	1	7d	56	3d	24	7d	56	3d	24
PK 120-01	712	709		50	0	108	72	448	8.0	2	3	8.0	1	7d	56	3d	24	7d	56	3d	24
				50	0	108	72	448	8.0	2	3	8.0	1	7d	56	3d	24	7d	56	3d	24
				50	0	108	72	448	8.0	2	3	8.0	1	7d	56	3d	24	7d	56	3d	24
	690	691	10.3	50	0	108	72	448	8.0	2	3	8.0	1	7d	56	3d	24	7d	56	3d	24
PK 120-02	720	728	9.4	50	0	108	72	448	8.0	2	3	8.0	1	7d	56	3d	24	7d	56	3d	24
	740	765	9.4	50	0	108	72	448	8.0	2	3	8.0	1	7d	56	3d	24	7d	56	3d	24
	732	732	7.0	54	0	120	220	385	7.9	6	5	12	1	9d	71.1	4.5d	31.6	9d	71.1	3d	23.7
	665	665	7.0	50	0	112	228	385	7.9	6	5	12	1	9d	71.1	4.5d	31.6	9d	71.1	3d	23.7
PK 121-01	705	705	7.0	90	0	200	220	675	13.9	4	5	20	1	9d	125	4.5d	55.6	9d	125	3d	41.7
	700	700	7.0	90	0	200	240	675	13.9	4	5	20	1	9d	125	4.5d	55.6	9d	125	3d	41.7
	723	723	7.0	32	60	140	220	313	7.9	6	4	8.0	2	9d	71	4.5d	32	9d	71	3d	24
	695	695	7.0	20	60	116	228	313	7.9	6	3	8.0	2	9d	71	4.5d	32	9d	71	3d	24
PK 122-01	704	704	7.0	48	84	200	220	472	11.9	4	4	10.0	2	9d	107	4.5d	48	9d	107	3d	36
	701	701	7.0	48	84	200	234	472	11.9	4	4	10.0	2	9d	107	4.5d	48	9d	107	3d	36
	711	711	7.0	32	59	200	220	241	7.9	6	3	6.0	3	9d	71	4.5d	32	9d	71	3d	24
	712	712	7.0	20	59	176	228	241	7.9	6	3	6.0	3	9d	71	4.5d	32	9d	71	3d	24

B.2 Tragfähigkeiten und Steifigkeiten der Anschlüsse parallel zur Faser

BU_StD18_8_0	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Mittelwert	COV
F _{2mm,pl.Verf.} [kN]	119.2	126.9	130.1	122.7	132.1	126.2	4%
F _{5mm} [kN]	116.7	125.6	126.2	125.2	130.1	124.8	4%
F _{15mm/max} [kN]	135.9	156.2	150.5	153.5	159.8	151.2	6%
K1 [N/mm]	48994	59544	55321	82921	64547	62265.6	21%
K1,1	50244	57616	58850	78585	67599	62578.8	17%
K1,2	47744	61471	51793	87257	61496	61952.4	25%
K2 [N/mm]	127022	150119	136746	152612	142568	141813.4	7%
K2,1	127583	148063	128969	150183	133767	137713.0	8%
K2,2	126462	152176	144523	155040	151368	145913.8	8%
D [-]	4.31	4.71	3.61	4.65	4.00	4.26	11%

Bu_StD19_8_0	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Mittelwert	COV
F _{2mm,pl.Verf.} [kN]	134.3	142.6	140.3	134.8	120.7	134.5	6%
F _{5mm} [kN]	131.4	135.6	132.1	131.7	117.2	129.6	5%
F _{15mm/max} [kN]	140.2	147.7	149.1	146.1	127.5	142.1	6%
K1 [N/mm]	65058	47617	48979	53780	47315	52550	14%
K1,1	54604	47312	43037	56102	50602	50332	11%
K1,2	75512	47921	54922	51458	44027	54768	22%
K2 [N/mm]	127969	112430	134635	131602	127297	126787	7%
K2,1	112976	111884	128507	126739	121366	120294	6%
K2,2	142963	112976	140763	136465	133227	133279	9%
D [-]	2.61	2.25	2.63	2.87	2.31	2.53	10%

BU_StD20_8_0	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Mittelwert	COV
F _{2mm,pl.Verf.} [kN]	106.5	125.8	116.4	123.9	118.5	118.2	6%
F _{5mm} [kN]	118.2	126.5	121.3	118.5	---	121.1	3%
F _{15mm/max} [kN]	119.0	130.0	123.7	123.9	118.5	123.0	4%
K1 [N/mm]	71223	49357	85891	55128	65577	65435	22%
K1,1	70597	54003	79423	57045	75894	67393	17%
K1,2	71848	44711	92360	53210	55259	63478	30%
K2 [N/mm]	103366	101541	106183	112121	118456	108333	6%
K2,1	98611	102474	100900	101222	123391	105320	10%
K2,2	108122	100607	111466	123020	113520	111347	7%
D [-]	2.47	1.80	3.00	1.81	1.59	2.13	27%

BU_StD21_8_0	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Mittelwert	COV
F _{2mm,pl.Verf.} [kN]	129.9		121.0	132.9	124.7	127.1	4%
F _{5mm} [kN]	128.6	---	119.1	132.2	125.5	126.4	4%
F _{15mm/max} [kN]	140.1	115.1	122.3	142.6	128.1	129.6	9%
K1 [N/mm]	57414	67443	46910	61414	68097	60256	14%
K1,1	54087	60795	49740	64873	50016	55902	12%
K1,2	60741	74092	44081	57956	86178	64610	25%
K2 [N/mm]	130581	135300	106160	128113	139240	127879	10%
K2,1	124171	131558	107252	127582	103893	118891	11%
K2,2	136991	139042	105068	128643	174586	136866	18%
D [-]	2.70	1.58	2.73	3.73	4.10	2.97	33%

BU_StD22_8_0	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Mittelwert	COV
F _{2mm,pl.Verf.} [kN]	61.7	62.4	60.7	59.3	59.3	60.7	2%
F _{5mm} [kN]	64.8	64.1	61.9	61.1	61.1	62.6	3%
F _{15mm/max} [kN]	74.1	79.2	76.9	72.6	73.3	75.2	4%
K1 [N/mm]	43742	29589	30032	29283	25051	31539	23%
K1,1	41122	21081	26778	29207	28158	29269	25%
K1,2	46362	38097	33286	29359	21945	33810	27%
K2 [N/mm]	65621	72851	70930	64901	64155	67692	6%
K2,1	53115	69505	66223	56453	65551	62169	11%
K2,2	78127	76198	75637	73349	62759	73214	8%
D [-]	4.77	5.12	4.89	3.95	4.07	4.56	11%

BU_StD23_8_0	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Mittelwert	COV
F _{2mm,pl.Verf.} [kN]	206.5	184.4	186.2	198.7		193.9	5%
F _{5mm} [kN]	200.7	179.9	182.6	191.4	---	188.7	5%
F _{15mm/max} [kN]	215.6	185.1	193.7	215.3	184.9	198.9	8%
K1 [N/mm]	99770	81868	87865	86769	85424	88339.3	8%
K1,1	97464	70580	76705	81014	68528	78858.0	15%
K1,2	102076	93157	99025	92524	102321	97820.7	5%
K2 [N/mm]	194627	176464	188096	184802	194976	187793.0	4%
K2,1	187278	160462	164303	177194	164303	170707.7	7%
K2,2	201977	192465	211890	192410	225649	204878.3	7%
D [-]	2.68	2.02	2.34	2.49	1.50	2.20	21%

BU_StD24_8_0	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Mittelwert	COV
F _{2mm,pl.Verf.} [kN]	116.8					116.8	
F _{5mm} [kN]	118.4					118.4	
F _{15mm/max} [kN]	121.0	125.2	130.6	107.6	124.9	121.8	7%
K1 [N/mm]	58424	67845	77349	75154	68641	69482.5	11%
K1,1	55008	62563	74867	69679	54536	63330.6	14%
K1,2	61841	73127	79830	80629	82746	75634.5	11%
K2 [N/mm]	146965	131538	121765	165750	128450	138893.7	13%
K2,1	148411	120052	127198	163675	112075	134282.0	16%
K2,2	145519	143025	116332	167826	144826	143505.5	13%
D [-]	2.45	1.61	1.58	1.56	1.38	1.71	24%

BU_StD26_8_0	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Mittelwert	COV
F _{2mm,pl.Verf.} [kN]		125.2	130.6			127.9	3%
F _{5mm} [kN]	118.4	---	---	---	---	118.4	
F _{15mm/max} [kN]	121.0	125.2	130.6	107.6	124.9	121.8	7%
K1 [N/mm]	41339	61502	46329	48247	43858	48255.0	16%
K1,1	38468	64543	42651	49533	45024	48043.9	21%
K1,2	44209	58462	50007	46962	42692	48466.2	13%
K2 [N/mm]	118789	117306	132298	108253	126284	120585.9	8%
K2,1	120312	114039	138328	106483	133054	122443.3	11%
K2,2	117266	120573	126267	110024	119513	118728.6	5%
D [-]	2.45	1.61	1.58	1.56	1.38	1.71	24%

BU_StD27_8_0	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Mittelwert	COV
F _{2mm,pl.Verf.} [kN]	122.6	131.4	121.6	129.1	128.2	126.6	3%
F _{5mm} [kN]	120.7	128.9	119.7	131.6	126.2	125.4	4%
F _{15mm/max} [kN]	141.0	132.3	121.6	135.4	146.9	135.5	7%
K1 [N/mm]	52442	57089	56657	97520	49669	62675.5	31%
K1,1	54143	50864	50000	91679	48380	59013.2	31%
K1,2	50741	63314	63314	103360	50959	66337.7	33%
K2 [N/mm]	139667	136198	136198	137469	132982	136502.9	2%
K2,1	130619	124309	124309	125325	123379	125588.2	2%
K2,2	148715	148087	148087	149612	142586	147417.6	2%
D [-]	3.26	1.81	1.53	3.27	3.55	2.68	35%

BU_StD29_8_0	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Mittelwert	COV
F _{2mm,pl.Verf.} [kN]	126.7	118.8	129.6	121.4	103.9	120.1	8%
F _{5mm} [kN]	122.6	115.1	123.6	117.1	120.0	119.7	3%
F _{15mm/max} [kN]	134.0	119.2	139.2	126.8	126.3	129.1	6%
K1 [N/mm]		42448	47744	42796	54964	46988.2	12%
K1,1		43385	48939	35366	51910	44900.1	16%
K1,2		41511	46549	50226	58019	49076.2	14%
K2 [N/mm]		133570	129276	132350	143839	134758.8	5%
K2,1		134495	131224	127253	141159	133532.6	4%
K2,2		132646	127327	137448	146519	135985.0	6%
D [-]	2.53	1.68	2.16	2.43	3.00	2.36	21%

BU_StD30_8_0	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Mittelwert	COV
F _{2mm,pl.Verf.} [kN]	132.4	145.8	138.4	137.7	139.3	138.7	3%
F _{5mm} [kN]	133.3	145.4	137.2	130.8	130.0	135.3	5%
F _{15mm/max} [kN]	147.4	159.5	150.3	145.0	144.4	149.3	4%
K1 [N/mm]	83985	83849	67745	50685	45132	66278.9	27%
K1,1	71237	68863	54332	56788	42007	58645.3	20%
K1,2	96732	98834	81157	44582	48257	73912.5	35%
K2 [N/mm]	164618	162998	133330	126394	126952	142858.3	14%
K2,1	142279	142955	112682	133448	124038	131080.6	10%
K2,2	186957	183041	153977	119339	129866	154635.9	20%
D [-]	3.91	3.39	3.33	2.54	2.27	3.09	22%

BU_StD31_8_0	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Mittelwert	COV
F _{2mm,pl.Verf.} [kN]	47.3	46.6	44.4	43.6	45.5	45.5	3%
F _{5mm} [kN]	49.7	47.2	47.2	44.1	47.1	47.1	4%
F _{15mm/max} [kN]	52.3	55.7	53.6	50.2	53.0	52.9	4%
K1 [N/mm]	39458	25399	38794	21314	27308	30454.5	27%
K1,1	45359	23087	46380	19816	28641	32656.5	38%
K1,2	33557	27711	31208	22812	25975	28252.5	15%
K2 [N/mm]	68560	63965	72917	52609	61882	63986.4	12%
K2,1	65882	60119	73532	52048	60000	62316.4	13%
K2,2	71237	67811	72301	53169	63764	65656.5	12%
D [-]	3.66	4.14	4.52	3.87	3.80	4.00	9%

BU_StD33_8_0	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Mittelwert	COV
F _{2mm,pl.Verf.} [kN]	292.8	268.7	317.2	291.3	292.8	292.6	6%
F _{5mm} [kN]	268.4	234.0	272.1	273.1	268.4	263.2	6%
F _{15mm/max} [kN]	336.1	268.7	349.1	336.1	336.1	325.2	10%
K1 [N/mm]	194662	302925	224039	231075	207693	232078.8	18%
K1,1	190212	360615	262566	267275	225539	261241.5	24%
K1,2	199113	245234	185513	194875	189847	202916.2	12%
K2 [N/mm]	303944	345489	289023	266971	301821	301449.5	10%
K2,1	279529	509299	258370	329336	319315	339169.9	29%
K2,2	328358	181679	319677	204606	284326	263729.2	25%
D [-]	1.71	1.34	1.72	1.71	1.71	1.64	10%

BU_StD34_8_0	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5 nicht au	Mittelwert	COV
F _{2mm,pl.Verf.} [kN]	90.1	82.6	83.7	78.6		83.7	6%
F _{5mm} [kN]	91.3	79.7	81.4	79.8		83.1	7%
F _{15mm/max} [kN]	104.6	105.1	98.4	95.0		100.8	5%
K1 [N/mm]	47735	28308	29771	41513		36831.6	25%
K1,1	35865	28053	31010	41456		34096.0	17%
K1,2	59605	28562	28532	41569		39567.2	37%
K2 [N/mm]	100701	83187	89078	87373		90084.4	8%
K2,1	85075	79350	90237	86034		85174.2	5%
K2,2	116327	87023	87918	88711		94994.6	15%
D [-]	4.11	4.24	4.32	4.33		4.2	2%

BU_StD35_8_0	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Mittelwert	COV
F _{2mm,pl.Verf.} [kN]	121.5	136.8	136.5	127.4	130.8	130.6	5%
F _{5mm} [kN]	117.6	134.5	130.2	121.8	130.8	127.0	6%
F _{15mm/max} [kN]	139.7	151.5	154.0	132.2	145.1	144.5	6%
K1 [N/mm]	48004	48004	55104	48903	72366	54476.4	19%
K1,1	47110	47110	71389	42343	72105	56011.5	26%
K1,2	48899	48899	38819	55462	72627	52941.2	24%
K2 [N/mm]	150674	150674	154344	152064	161641	153879.2	3%
K2,1	152284	152284	156413	135388	160279	151329.5	6%
K2,2	149063	149063	152275	168739	163003	156428.8	6%
D [-]	3.65	3.48	3.21	2.06	3.20	3.12	20%

BU_StD36_8_0	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Mittelwert	COV
F _{2mm,pl,Verf.} [kN]	193.1	208.3	185.6	197.6	195.3	196.0	4%
F _{5mm} [kN]	208.1	216.8	198.5	209.5	200.9	206.7	4%
F _{15mm/max} [kN]	213.4	229.5	221.6	230.9	221.0	223.3	3%
K1 [N/mm]							
K1,1							
K1,2							
K2 [N/mm]							
K2,1							
K2,2							
D [-]	1.48	1.53	2.07	1.97	2.02	1.81	16%

BU_StD37_8_0	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Mittelwert	COV
F _{2mm,pl,Verf.} [kN]	268.8	302.5	273.8	284.5	279.8	281.9	5%
F _{5mm} [kN]	196.6	274.8	266.4	250.0	249.3	247.4	12%
F _{15mm/max} [kN]	285.0	337.8	273.8	324.7	292.2	302.7	9%
K1 [N/mm]	171548	231598	216343	177078	190922	197497.9	13%
K1,1	174682	229703	243830	124340	180259	190562.8	25%
K1,2	168415	233493	188857	229816	201586	204433.1	13%
K2 [N/mm]	302597	351818	318384	353620	344213	334126.6	7%
K2,1	312121	346596	288611	214559	318103	295998.1	17%
K2,2	293074	357041	348156	492682	370323	372255.1	20%
D [-]	1.43	1.68	1.17	1.81	1.39	1.50	17%

BU_StD39_8_0	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Mittelwert	COV
F _{2mm,pl,Verf.} [kN]	202.3	181.8	202.8	210.4	197.0	198.9	5%
F _{5mm} [kN]	198.3	---	197.2	205.7	191.4	198.1	3%
F _{15mm/max} [kN]	214.2	181.8	202.8	211.1	201.9	202.3	6%
K1 [N/mm]	113024	95851	90146	107226	112186	103686.6	10%
K1,1	105807	103085	97005	113249	95923	103013.8	7%
K1,2	120241	88617	83287	101204	128448	104359.4	19%
K2 [N/mm]	227456	169874	167116	180976	182407	185566.0	13%
K2,1	214841	169874	150917	161775	162899	172061.0	14%
K2,2	240071	169874	183315	200178	201916	199070.9	13%
D [-]	2.70	1.47	1.74	1.94	2.20	2.01	23%

BU_StD45_8_0	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Mittelwert	COV
F _{2mm,pl,Verf.} [kN]	101.1	100.3	102.6	99.2	101.9	101.0	1%
F _{5mm} [kN]	102.8	100.9	102.8	98.6	101.7	101.4	2%
F _{15mm/max} [kN]	110.3	106.6	120.5	100.7	103.0	108.2	7%
K1 [N/mm]	62669	59669	75605	72700	65697	67267.7	10%
K1,1	75238	49587	111801	79646	56782	74610.9	33%
K1,2	50099	69751	39408	65753	74611	59924.6	25%
K2 [N/mm]	97449	98044	115441	114106	112378	107483.7	8%
K2,1	120670	100935	143867	120111	108000	118716.5	14%
K2,2	74227	95154	87016	108100	116757	96250.8	17%
D [-]	2.88	2.61	5.27	2.07	-	3.21	44%

BU_StD47_8_0	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4 zu kurz	Serie 5 zu kurz	Mittelwert	COV
F _{2mm,pl,Verf.} [kN]	109.1	113.5	112.2	111.7		111.6	2%
F _{5mm} [kN]	108.2	111.7	108.5	109.3		109.4	1%
F _{15mm/max} [kN]	117.8	118.9	115.8	111.7		116.0	3%
K1 [N/mm]	55978	50974	61342	53896	56645	55767.1	7%
K1,1	54423	57673	43700	57055	52397	53049.7	11%
K1,2	57533	44276	78983	50737	60893	58484.4	22%
K2 [N/mm]	123756	107129	130163	117728	109016	117558.3	8%
K2,1	121565	111840	107538	107876	110079	111779.8	5%
K2,2	125946	102418	152787	127580	107954	123336.8	16%
D [-]	2.56	2.42				2.49	4%

BU_StD51_12_0	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Mittelwert	COV
F _{2mm,pl.Verf.} [kN]	279.9	323.1	324.8	313.1	331.6	314.5	7%
F _{5mm} [kN]	198.7	271.5	279.6	281.1	289.9	264.2	14%
F _{15mm/max} [kN]	304.5	327.5	331.6	330.2	338.1	326.4	4%
K1 [N/mm]	125267	125267	122138	116329	153602	128521	11%
K1,1	138179	138179	112064	121265	150520	132041	12%
K1,2	112355	112355	132212	111393	156684	125000	16%
K2 [N/mm]	193953	193953	180262	186812	218205	194637	7%
K2,1	215390	215390	180291	183381	287873	216465	20%
K2,2	172517	172517	180233	190244	148538	172810	9%
D [-]	1.03	1.45	1.58	1.14	1.39	1.32	17%

BU_StD53_20_0	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Mittelwert	COV
F _{2mm,pl.Verf.} [kN]	588.7	572.3				580.5	2%
F _{5mm} [kN]	415.0	444.0				429.5	5%
F _{15mm/max} [kN]	668.4	698.7				683.6	3%
K1 [N/mm]	380895	390277	455125	0	0	408766	10%
K1,1	515133	332738	506448			451440	23%
K1,2	246656	447817	403802			366092	29%
K2 [N/mm]	426719	547598	516429	0	0	496915	13%
K2,1	535025	682006	585775			600935	12%
K2,2	318413	413189	447084			392895	17%
D [-]	1.84					1.8	---

BU_StD128_8_0	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Mittelwert	COV
F _{2mm,pl.Verf.} [kN]	137.7	112.4	141.4			130.5	12%
F _{5mm} [kN]	140.9	75.5	146.8			121.1	33%
F _{15mm/max} [kN]	156.8	112.4	155.9			141.7	18%
K1 [N/mm]							
K1,1							
K1,2							
K2 [N/mm]							
K2,1							
K2,2							
D [-]	3.82	1.89	4.53			3.42	40%

BU_StD129_8_0	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Mittelwert	COV
F _{2mm,pl.Verf.} [kN]	130.6					130.6	
F _{5mm} [kN]	133.2					133.2	
F _{15mm} [kN]	166.9						
F _{15mm/max} [kN]	170.0					170.0	
K1 [N/mm]							
K1,1							
K1,2							
K2 [N/mm]							
K2,1							
K2,2							
D [-]	7.77					7.77	

BU_StD132_8_0	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Mittelwert	COV
F _{2mm,pl.Verf.} [kN]	127.9	130.6	126.7			128.4	2%
F _{5mm} [kN]	98.7	106.0	109.9			104.9	5%
F _{15mm/max} [kN]	143.9	159.5	127.2			143.5	11%
K1 [N/mm]							
K1,1							
K1,2							
K2 [N/mm]							
K2,1							
K2,2							
D [-]	2.11	3.59	1.63			2.44	42%

B.3 Kennwerte zu den Versuchsserien senkrecht zur Faser

	$\rho_{1,HF}$	$\rho_{2,HF}$	u	t_1	t_2	b	h	l	d	m	n	t_{Blech}	n_{Bleche}	a_1	a_2	a_3	a_4	h_e/h
	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[M%]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]			[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	
BU_StD54_8_90 (9d)	733	754	8.65	50		108	108	512	8.0	3	2	8.0	1	9d	72	3d	24	0.7
	717	723	8.4	50	0	108	108	512	8.0	3	2	8.0	1	9d	72	3d	24	0.7
	722	727	8.25	50	0	108	108	512	8.0	3	2	8.0	1	9d	72	3d	24	0.7
	723	704	7.8	50	0	108	108	512	8.0	3	2	8.0	1	9d	72	3d	24	0.7
	745	712	8.95	50	0	108	108	512	8.0	3	2	8.0	1	9d	72	3d	24	0.7
BU_StD55_8_90 (7d)	722	738	8.05	50		108	108	448	8.0	3	2	8.0	1	7d	56	3d	24	0.7
	788	733	8.2	50	0	108	108	448	8.0	3	2	8.0	1	7d	56	3d	24	0.7
	728	733	8.5	50	0	108	108	448	8.0	3	2	8.0	1	7d	56	3d	24	0.7
	716	784	8.7	50	0	108	108	448	8.0	3	2	8.0	1	7d	56	3d	24	0.7
	763	728	8.85	50	0	108	108	448	8.0	3	2	8.0	1	7d	56	3d	24	0.7
BU_StD56_8_90 (5d)	710	732	9	50		108	108	384	8.0	3	2	8.0	1	5d	40	3d	24	0.7
	733	721	8.6	50	0	108	108	384	8.0	3	2	8.0	1	5d	40	3d	24	0.7
	722	736	8.6	50	0	108	108	384	8.0	3	2	8.0	1	5d	40	3d	24	0.7
	751	795	8.3	50	0	108	108	384	8.0	3	2	8.0	1	5d	40	3d	24	0.7
	726	718	8.6	50	0	108	108	384	8.0	3	2	8.0	1	5d	40	3d	24	0.7
BU_StD57_8_90 (3d)	756	767	10.4	50		108	108	448	8.0	3	2	8.0	1	3d	24	3d	24	0.7
	758	755	9.7	50	0	108	108	448	8.0	3	2	8.0	1	3d	24	3d	24	0.7
	825	754	9.8	50	0	108	108	448	8.0	3	2	8.0	1	3d	24	3d	24	0.7
BU_StD58_8_90 (2d)	704	713	8.65	50		108	100	448	8.0	3	2	8.0	1	7d	56	2d	16	0.7
	731	723	8.45	50	0	108	100	448	8.0	3	2	8.0	1	7d	56	2d	16	0.7
	792	713	9.25	50	0	108	100	448	8.0	3	2	8.0	1	7d	56	2d	16	0.7
	745	728	8.7	50	0	108	100	448	8.0	3	2	8.0	1	7d	56	2d	16	0.7
	775	731	8.85	50	0	108	100	448	8.0	3	2	8.0	1	7d	56	2d	16	0.7
BU_StD60_8_90 (4d)	724	734	8.7	50		108	116	448	8.0	3	2	8.0	1	7d	56	4d	32	0.7
	725	717	9.45	50	0	108	116	448	8.0	3	2	8.0	1	7d	56	4d	32	0.7
	705	736	9.25	50	0	108	116	448	8.0	3	2	8.0	1	7d	56	4d	32	0.7
	700	735	8.35	50	0	108	116	448	8.0	3	2	8.0	1	7d	56	4d	32	0.7
	767	766	9	50	0	108	116	448	8.0	3	2	8.0	1	7d	56	4d	32	0.7
BU_StD61_8_90 (t=30)	733	706	8.15	30		68	84	224	8.0	1	1	8.0	1					0.7
	734	747	8.85	30	0	68	84	224	8.0	1	1	8.0	1					0.7
	740	691	8.9	30	0	68	84	224	8.0	1	1	8.0	1					0.7
	735	722	8.4	30	0	68	84	224	8.0	1	1	8.0	1					0.7
	761	711	8.05	30	0	68	84	224	8.0	1	1	8.0	1					0.7
BU_StD62_8_90 (t=50)	740	746	10.55	50		108	84	224	8.0	1	1	8.0	1					0.7
	727	729	10.4	50	0	108	84	224	8.0	1	1	8.0	1					0.7
	721	711	10.55	50	0	108	84	224	8.0	1	1	8.0	1					0.7
	719	742	10.45	50	0	108	84	224	8.0	1	1	8.0	1					0.7
	718	754	10.55	50	0	108	84	224	8.0	1	1	8.0	1					0.7
BU_StD63_8_90 (t=20)	694	713	9.1	20		48	84	224	8.0	1	1	8.0	1					0.7
	711	711	9.15	20	0	48	84	224	8.0	1	1	8.0	1					0.7
	706	733	8.75	20	0	48	84	224	8.0	1	1	8.0	1					0.7
	735	700	9.25	20	0	48	84	224	8.0	1	1	8.0	1					0.7
	721	704	9.45	20	0	48	84	224	8.0	1	1	8.0	1					0.7
BU_StD67_12_90	739	732	8.6	70		148	126	236	12.0	1	1	8.0	1					0.7
	730	743	8.7	70	0	148	126	236	12.0	1	1	8.0	1					0.7
	723	729	9.55	70	0	148	126	236	12.0	1	1	8.0	1					0.7
	757	745	9.15	70	0	148	126	236	12.0	1	1	8.0	1					0.7
	736	726	8.6	70	0	148	126	236	12.0	1	1	8.0	1					0.7
BU_StD69_20_90	686	677	9.05	100		208	210	260	20.0	1	1	8.0	1					0.7
	706	653	9.35	100	0	208	210	260	20.0	1	1	8.0	1					0.7
	702	712	9.05	100	0	208	210	260	20.0	1	1	8.0	1					0.7
	727	715	8.85	100	0	208	210	260	20.0	1	1	8.0	1					0.7
	719	694	9.35	100	0	208	210	260	20.0	1	1	8.0	1					0.7
BU_StD150_8_90	710	710	10.94	0	30	30	160	985	8.0	1	3	8.0	2	0	0	3d	24	0.7
Biegung	734	734	10.98	0	30	30	160	985	8.0	1	3	8.0	2	0	0	3d	24	0.7
Biegung	799	799	11.39	0	30	30	160	985	8.0	1	3	8.0	2	0	0	3d	24	0.7
Druck	713	713	10.85	0	30	30	160	500	8.0	1	3	8.0	2	0	0	3d	24	0.7
Druck	702	702	11.14	0	30	30	160	500	8.0	1	3	8.0	2	0	0	3d	24	0.7
Druck	703	703	10.45	0	30	30	160	500	8.0	1	3	8.0	2	0	0	3d	24	0.7
BU_StD151_8_90	736	736	11.56	0	40	40	160	985	8.0	1	3	8.0	2	0.0	0	3d	24	0.7
Biegung	777	777	10.7	0	40	40	160	985	8.0	1	3	8.0	2	0	0	3d	24	0.7
Biegung	724	724	10.92	0	40	40	160	985	8.0	1	3	8.0	2	0	0	3d	24	0.7
Druck	685	685	9.747	0	40	40	160	500	8.0	1	3	8.0	2	0	0	3d	24	0.7
Druck	683	683	9.612	0	40	40	160	500	8.0	1	3	8.0	2	0	0	3d	24	0.7
Druck	710	710	9.618	0	40	40	160	500	8.0	1	3	8.0	2	0	0	3d	24	0.7
BU_StD152_8_90	742	742	10.25	0	50	50	160	985	8.0	1	3	8.0	2	0.0	0	3d	24	0.7
Biegung	729	729	10.3	0	50	50	160	985	8.0	1	3	8.0	2	0	0	3d	24	0.7
Biegung	729	729	10.95	0	50	50	160	985	8.0	1	3	8.0	2	0	0	3d	24	0.7
Druck	719	719	10.01	0	50	50	160	500	8.0	1	3	8.0	2	0	0	3d	24	0.7
Druck	705	705	9.876	0	50	50	160	500	8.0	1	3	8.0	2	0	0	3d	24	0.7
Druck	692	692	10.64	0	50	50	160	500	8.0	1	3	8.0	2	0	0	3d	24	0.7

BU_StD153_8_90	711	711	10.36	0	60	60	160	985	8.0	1	3	8.0	2	0.0	0	3d	24	0.7
Biegung	754	754	10.96	0	60	60	160	985	8.0	1	3	8.0	2	0	0	3d	24	0.7
Biegung	732	732	10.91	0	60	60	160	985	8.0	1	3	8.0	2	0	0	3d	24	0.7
Druck	717	717	10.05	0	60	60	160	500	8.0	1	3	8.0	2	0	0	3d	24	0.7
Druck	703	703	9.553	0	60	60	160	500	8.0	1	3	8.0	2	0	0	3d	24	0.7
Druck	746	746	9.723	0	60	60	160	500	8	1	3	8	2	0	0	3d	24	0.7
BU_StD154_8_90	678	678	9.452	15	55	101	160	1000	7.9	1	3	8.0	2	0.0	0	3d	24	0.8
	680	680	10.05	15	55	101	160	1000	7.9	1	3	8.0	2	0	0	3d	24	0.8
	666	666		15	55	101	160	1000	7.9	1	3	8.0	2	0	0	3d	24	0.8
BU_StD155_8_90	695	695	9.813	20	55	111	160	1000	7.9	1	3	8.0	2	0.0	0	3d	24	0.8
	668	668	9.724	20	55	111	160	1000	7.9	1	3	8.0	2	0	0	3d	24	0.8
	693	693	10.24	20	55	111	160	1000	7.9	1	3	8.0	2	0	0	3d	24	0.8
BU_StD156_8_90	696	696	9.317	25	55	121	160	1000	7.9	1	3	8.0	2	0.0	0	3d	24	0.8
	685	685	8.916	25	55	121	160	1000	7.9	1	3	8.0	2	0	0	3d	24	0.8
	673	673		25	55	121	160	1000	7.9	1	3	8.0	2	0	0	3d	24	0.8
BU_StD171_8_90	708	708	9.093	50	0	108	160	800	7.9	3	3	8.0	1	5d	40	6d	47	0.8
	706	706	10.39	50	0	108	160	800	7.9	3	3	8.0	1	5d	40	6d	47	0.8
	721	721	10.93	50	0	108	160	800	7.9	3	3	8.0	1	5d	40	6d	47	0.8
BU_StD172_8_90	706	706	9.904	50	0	108	160	800	7.9	3	3	8.0	1	5d	40	3d	24	0.8
	719	719	10.09	50	0	108	160	800	7.9	3	3	8.0	1	5d	40	3d	24	0.8
	740	740	10.13	50	0	108	160	800	7.9	3	3	8.0	1	5d	40	3d	24	0.8
BU_StD173_8_90	700	700	10.73	50	0	108	160	800	7.9	2	3	8.0	1	10d	79	6d	47	0.8
	701	701	8.751	50	0	108	160	800	7.9	2	3	8.0	1	10d	79	6d	47	0.8
	718	718	11.06	50	0	108	160	800	7.9	2	3	8.0	1	10d	79	6d	47	0.8
BU_StD174_8_90	729	729	10.64	50	0	108	160	800	7.9	2	3	8.0	1	10d	79	3d	24	0.8
	719	719	10.12	50	0	108	160	800	7.9	2	3	8.0	1	10d	79	3d	24	0.8
	734	734	10.07	50	0	108	160	800	7.9	2	3	8.0	1	10d	79	3d	24	0.8
BU_StD168_8_90	784	766	9.2	50	0	100	0	0	8.0	3	2	0.0	1	7d	56	3d	24	0.7
	697	689		50	0	100	0	0	8.0	3	2	0.0	1	7d	56	3d	24	0.7
	720	728	8.9	50	0	100	0	0	8	3	2	0	1	7d	56	3d	24	0.7
	787	739	8.7	50	0	100	0	0	8	3	2	0	1	7d	56	3d	24	0.7
BU_StD169_8_90	700	692		50	0	100	0	0	8	3	2	0	1	7d	56	3d	24	0.7
	680	687		50	0	100	0	0	8	3	2	0	1	7d	56	3d	24	0.7
				50	0	100	0	0	8	3	2	0	1	7d	56	3d	24	0.7

B.4 Tragfähigkeiten und Steifigkeiten zu Anschlüssen senkrecht zur Faser

BU_StD54_8_90	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Mittelwert	COV
F _{2mm,pl,Verf.} [kN]	109.0	117.2	121.0		115.5	116	4%
F _{5mm} [kN]	77.8	87.5	81.2		99.3	86	11%
F _{15mm/max} [kN]	111.0	131.8	140.9		138.6	131	10%
K ₁ [N/mm]	46416	45739	34150		38637	41235	14%
K _{1,1}							
K _{1,2}							
K ₂ [N/mm]	123921	97014	146721		126945	123650	17%
K _{2,1}							
K _{2,2}							
D [-]	1.64	1.79	1.73		2.20	2	13%

BU_StD55_8_90	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Mittelwert	COV
F _{2mm,pl,Verf.} [kN]	113.7	120.5	131.8	128.2	105.9	123.5	---
F _{5mm} [kN]	100.1	97.1	104.8	101.9	101.8	101.1	---
F _{15mm/max} [kN]	113.7	122.0	131.8	133.8	105.9	121.4	10%
K ₁ [N/mm]	88280	80258	95136	76031	103886	88718	13%
K _{1,1}							
K _{1,2}							
K ₂ [N/mm]	237361	257670	294920	260484	276675	265422	8%
K _{2,1}							
K _{2,2}							
D [-]	1.48	1.52	1.38	1.93	1.42	1.55	14%

BU_StD56_8_90	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Mittelwert	COV
F _{2mm,pl.Verf.} [kN]	---	---	106.0	100.3	101.4	103.2	3%
F _{5mm} [kN]	91.8	102.5	87.7	94.7	84.9	92.3	7%
F _{15mm/max} [kN]	107.9	118.8	130.3	140.2	125.3	124.5	10%
K1 [N/mm]	keine Daten	43210	38328	42409	46872	42705	8%
K1,1							
K1,2							
K2 [N/mm]	keine Daten	180106	106725	96701	120488	126005	30%
K2,1							
K2,2							
D [-]	1.90	2.77	2.31	3.61	2.93	2.70	24%

BU_StD57_8_90	Serie 1	Serie 2	Serie 3			Mittelwert	COV
F _{2mm,pl.Verf.} [kN]	96.9	103.4	104.7			101.7	4%
F _{5mm} [kN]	92.1	97.0	94.1			94.4	3%
F _{15mm/max} [kN]	116.4	126.8	133.4			125.6	7%
K1 [N/mm]	201494	85289	125574			137452.3	43%
K1,1							
K1,2							
K2 [N/mm]	271019	150421	262427			227956	30%
K2,1							
K2,2							
D [-]	5.24	3.11	4.12			4.16	26%

BU_StD58_8_90	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Mittelwert	COV
F _{2mm,pl.Verf.} [kN]	106.4	---	119.1	96.8	97.2	107.4	---
F _{5mm} [kN]	88.6	93.5	103.1	95.2	89.8	95.1	---
F _{15mm/max} [kN]	109.8	100.0	130.5	100.5	103.6	108.9	12%
K1 [N/mm]	50577	57558	59241	85992	45503	59775	26%
K1,1							
K1,2							
K2 [N/mm]	121995	99104	105782	147199	86739	112164	21%
K2,1							
K2,2							
D [-]	1.67	1.54	2.07	2.05	2.26	1.92	16%

BU_StD60_8_90	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Mittelwert	COV
F _{2mm,pl.Verf.} [kN]	107.2	106.6	117.2	110.1		110	4%
F _{5mm} [kN]	96.5	97.3	95.5	103.7		98	4%
F _{15mm/max} [kN]	151.9	135.8	145.5	144.5		144	5%
K1 [N/mm]	46557	46910	48040	28919		42606	21%
K1,1							
K1,2							
K2 [N/mm]	105260	147310	180605	81349		128631	34%
K2,1							
K2,2							
D [-]	2.93	2.78	2.52	3.10		3	9%

BU_StD61_8_90	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Mittelwert	COV
F _{2mm,pl.Verf.} [kN]	16.1	15.2	14.8	13.8	13.1	15.0	8%
F _{5mm} [kN]	13.1	10.7	15.9	16.1	14.7	14.1	16%
F _{15mm/max} [kN]	27.3	21.9	29.1	31.3	28.2	27.6	13%
K1 [N/mm] Rohdate	12131	11752	12128	11627	11845	11896.6	2%
K1,1							
K1,2							
K2 [N/mm]	21260	21322	21260	21260	21260	21272.1	0%
K2,1							
K2,2							
D [-]	3.50	2.49	10.44	14.72	18.24	9.9	70%

BU_StD62_8_90	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Mittelwert	COV
F _{2mm,pl.Verf.} [kN]	21.8	18.6	18.0	18.9	19.1	19.3	8%
F _{5mm} [kN]	23.2	17.1	18.2	21.1	21.2	20.1	12%
F _{15mm/max} [kN]	32.3	30.1	28.9	30.3	31.0	30.5	4%
K1 [N/mm]		17509	17256	17317	17533	17404	1%
K1,1							
K1,2							
K2 [N/mm]		30895	31045	30980	31120	31010	0%
K2,1							
K2,2							
D [-]	10.10	4.39	6.78	11.86	11.65	9.0	36%

BU_StD63_8_90	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Mittelwert	COV
F _{2mm,pl.Verf.} [kN]	11.1	12.3	12.1	12.2	11.8	11.9	4%
F _{5mm} [kN]	12.7	14.2	13.6	13.8	13.6	13.6	4%
F _{15mm/max} [kN]	19.3	20.9	22.5	21.6	21.5	21.2	6%
K1 [N/mm]							
K1,1							
K1,2							
K2 [N/mm]							
K2,1							
K2,2							
D [-]	29.29	32.60	34.65	25.30	29.94	30.5	12%

BU_StD67_12_90	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Mittelwert	COV
F _{2mm,pl.Verf.} [kN]	36.8	38.3	33.3	38.1	35.0	36.6	6%
F _{5mm} [kN]	39.8	40.2	33.7	41.6	38.6	38.8	8%
F _{15mm/max} [kN]	69.9	65.3	62.1	70.1	64.9	66.4	5%
K1 [N/mm]	27976	23813	17851	28808	34156	24612	25%
K1,1							
K1,2							
K2 [N/mm]	41979	51076	43950	48680	52251	46421	10%
K2,1							
K2,2							
D [-]	12.21	13.46	7.53	14.58	14.75	11.95	25%

BU_StD69_20_90	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Mittelwert	COV
F _{2mm,pl.Verf.} [kN]	97.5	81.3		74.9	89.2	84.6	12%
F _{5mm} [kN]	95.0	85.4		75.5	91.5	86.8	10%
F _{15mm/max} [kN]	143.0	137.0		127.0	142.0	137.3	5%
K1 [N/mm]	82084	85791		55860	134807	74578	44%
K1,1 Grosse Untee	121954	131111		63946	227156		
K1,2	42214	40470		47774	42459		
K2 [N/mm]	142451	144777		108469	136144	131899	13%
K2,1	232523	234234		138086	210804		
K2,2	52379	55319		78852	61484		
D [-]	4.75	8.13		7.53	4.75	6.81	26%

BU_StD150_8_90BV	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Mittelwert	COV
F _{2mm,pl.Verf.} [kN]	---	---	---				
F _{5mm} [kN]	23.9	25.4	27.1			25.4	6%
F _{15mm/max} [kN]	33.1	35.1	37.7			35.3	7%
K1 [N/mm]	41086	42481	39635			41067	3%
K1,1							
K1,2							
K2 [N/mm]	53093	44351	54501			50649	11%
K2,1							
K2,2							
D [-]	1.36	1.43	1.32			1.37	4%

BU_StD151_8_90BV	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Mittelwert	COV
F _{2mm,pl.Verf.} [kN]	47.8	48.1	48.3			48.1	0%
F _{5mm} [kN]	35.5	34.2	35.2			35.0	2%
F _{15mm/max} [kN]	48.7	57.6	48.6			51.6	10%
K1 [N/mm]	53077	52003	42871			49317	11%
K1,1							
K1,2							
K2 [N/mm]	75455	74791	67471			72572	6%
K2,1							
K2,2							
D [-]	2.14	1.99	1.51			1.88	17%

BU_StD152_8_90BV	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Mittelwert	COV
F _{2mm,pl.Verf.} [kN]	57.7	61.8	57.7			59.0	4%
F _{5mm} [kN]	40.2	41.2	41.8			41.1	2%
F _{15mm/max} [kN]	68.5	67.5	50.4			62.1	16%
K1 [N/mm]	72921	48005	49057			56661	25%
K1,1							
K1,2							
K2 [N/mm]	82526	80022	80022			80857	2%
K2,1							
K2,2							
D [-]	2.57	1.63	1.29			1.83	36%

BU_StD153_8_90BV	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Mittelwert	COV
F _{2mm,pl.Verf.} [kN]	59.1	64.3	60.7			61.4	4%
F _{5mm} [kN]	44.4	44.9	46.4			45.2	2%
F _{15mm/max} [kN]	68.3	81.6	69.6			73.2	10%
K1 [N/mm]	36615	55487	44871			45658	21%
K1,1							
K1,2							
K2 [N/mm]	58963	103847	79779			80863	28%
K2,1							
K2,2							
D [-]	1.83	1.96	1.76			1.85	6%

BU_StD150_8_90DV	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Mittelwert	COV
F _{2mm,pl.Verf.} [kN]	37.7	53.1	55.8			48.9	20%
F _{5mm} [kN]	49.8	50.4	50.0			50.1	1%
F _{15mm/max} [kN]	67.1	69.2	65.3			67.2	3%
K1 [N/mm]	28412	51848	40131			40130	29%
K1,1							
K1,2							
K2 [N/mm]	51387	61210	52489			55029	10%
K2,1							
K2,2							
D [-]	13.46	21.55	13.68			16.23	28%

BU_StD151_8_90DV	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Mittelwert	COV
F _{2mm,pl.Verf.} [kN]	63.4	55.4	67.5			62.1	10%
F _{5mm} [kN]	54.3	51.2	58.7			54.7	7%
F _{15mm/max} [kN]	79.4	76.3	87.3			81.0	7%
K1 [N/mm]	36402	32468	44172			37681	16%
K1,1							
K1,2							
K2 [N/mm]	55553	50970	65711			57411	13%
K2,1							
K2,2							
D [-]	13.19		7.28			10.23	41%

BU_StD152_8_90DV	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Mittelwert	COV
F _{2mm,pl.Verf.} [kN]	72.2	69.0	71.1			70.8	2%
F _{5mm} [kN]	65.1	61.4	62.4			63.0	3%
F _{15mm/max} [kN]	102.9	98.3	97.7			99.6	3%
K1 [N/mm]	59859	50986	44287			51711	15%
K1,1							
K1,2							
K2 [N/mm]	71922	59207	68661			66597	10%
K2,1							
K2,2							
D [-]	10.99	12.46				11.73	9%

BU_StD153_8_90DV	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Mittelwert	COV
F _{2mm,pl.Verf.} [kN]	67.9	66.6	73.1			69.2	5%
F _{5mm} [kN]	59.6	57.7	59.5			58.9	2%
F _{15mm/max} [kN]	101.8	98.4	110.8			103.7	6%
K1 [N/mm]	51092	--	28348			39720	40%
K1,1							
K1,2							
K2 [N/mm]	62366	--	62366			62366	0%
K2,1							
K2,2							
D [-]	10.51	8.53	5.11			8.05	34%

BU_StD154_8_90	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Mittelwert	COV
F _{2mm,pl.Verf.} [kN]	102.9	99.2	103.0			101.7	2%
F _{5mm} [kN]	90.5	91.4	84.0			88.6	5%
F _{15mm/max} [kN]	142.9	140.8	128.3			137.3	6%
K1 [N/mm]	61195	62907	46431			56844	16%
K2 [N/mm]	145644	153751	133907			144434	7%
D [-]	4.60	5.92	5.07			5.19	13%

BU_StD155_8_90	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Mittelwert	COV
F _{2mm,pl.Verf.} [kN]	104.8	95.3	99.0			99.7	5%
F _{5mm} [kN]	89.6	89.1	88.3			89.0	1%
F _{15mm/max} [kN]	145.2	138.5	145.5			143.0	3%
K1 [N/mm]	58002	75946	63090			65679	14%
K1,1							
K1,2							
K2 [N/mm]	130801	156595	168602			151999	13%
K2,1							
K2,2							
D [-]	3.87	6.99	4.67			5.18	31%

BU_StD156_8_90	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Mittelwert	COV
F _{2mm,pl.Verf.} [kN]	102.6	99.6	92.1			98.1	6%
F _{5mm} [kN]	92.9	91.2	91.4			91.8	1%
F _{15mm/max} [kN]	157.6	151.6	149.0			152.8	3%
K1 [N/mm]	68783	65914	34860			56519	33%
K1,1							
K1,2							
K2 [N/mm]	151341	160664	71717			127908	38%
K2,1							
K2,2							
D [-]	4.90	6.07	7.44			6.14	21%

BU_StD168_8_90	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Mittelwert	COV
F _{2mm,pl.Verf.} [kN]	142.6		109.6	127.2		126.5	13%
F _{5mm} [kN]	136.0		94.6	99.6		110.1	21%
F _{15mm/max} [kN]	176.9		129.1	141.1		149.0	17%
K1 [N/mm]							
K1,1							
K1,2							
K2 [N/mm]							
K2,1							
K2,2							
D [-]	5.9		3.2	4.1		4.38	31%

BU_StD169_8_90	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Mittelwert	COV
F _{2mm,pl.Verf.} [kN]	104.9	104.9				104.9	0%
F _{5mm} [kN]	92.3	88.3				90.3	3%
F _{15mm/max} [kN]	133.4	141.8				137.6	4%
K1 [N/mm]							
K1,1							
K1,2							
K2 [N/mm]							
K2,1							
K2,2							
D [-]	5.2	4.9				5.05	5%

BU_StD171_8_90	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Mittelwert	COV
F _{2mm,pl.Verf.} [kN]	148.6	144.2	138.7			143.8	3%
F _{5mm} [kN]	108.4	117.2	111.1			112.2	4%
F _{15mm/max} [kN]	190.9	171.6	171.6			178.0	6%
K1 [N/mm]	130796	122569	163160			138842	15%
K1,1							
K1,2							
K2 [N/mm]	163179	156721	240000			186633	25%
K2,1							
K2,2							
D [-]	1.57	2.32	2.71			2.20	26%

BU_StD172_8_90	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Mittelwert	COV
F _{2mm,pl.Verf.} [kN]	137.0	146.5	156.6			146.7	7%
F _{5mm} [kN]	109.5	109.2	115.5			111.4	3%
F _{15mm/max} [kN]	173.0	184.9	189.9			182.6	5%
K1 [N/mm]	133520	130070	125726			129772	3%
K1,1							
K1,2							
K2 [N/mm]	172199	180639	190582			181140	5%
K2,1							
K2,2							
D [-]	4.67	3.36	2.64			3.56	29%

BU_StD173_8_90	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Mittelwert	COV
F _{2mm,pl.Verf.} [kN]	108.1	111.3	111.5			110.3	2%
F _{5mm} [kN]	96.8	100.6	78.0			91.8	13%
F _{15mm/max} [kN]	156.6	148.6	146.3			150.5	4%
K1 [N/mm]	120862	114221	107170			114084	6%
K1,1							
K1,2							
K2 [N/mm]	164470	194883	174938			178097	9%
K2,1							
K2,2							
D [-]	3.14	2.52	2.36			2.67	16%

BU_StD174_8_90	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Mittelwert	COV
F _{2mm,pl.Verf.} [kN]	111.3	108.6	108.6			109.5	1%
F _{5mm} [kN]	92.0	88.8	88.6			89.8	2%
F _{15mm/max} [kN]	159.3	155.7	155.3			156.8	1%
K1 [N/mm]	n.v.	112360	93651			103005	13%
K1,1							
K1,2							
K2 [N/mm]	n.v.	166137	143019			154578	11%
K2,1							
K2,2							
D [-]	3.24	3.58	3.01			3.28	9%

B.5 Tragfähigkeiten und Steifigkeiten der Passbolzenversuche parallel zur Faser

BU_PBo12_0_IN	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Mittelwert	COV
F _{2mm,pl.Verf.} [kN]	84.5				87.4	85.9	2%
F _{5mm} [kN]							
F _{15mm} [kN]							
F _{max} [kN]	85.5	85.9	88.2	91.9	87.9	87.9	1%
K1 [N/mm]	53189	82328	43999	71773	57055	61669	25%
K2 [N/mm]	165745	158276	426752	237293	220660	241745	45%
D [-]	3.64	2.89	2.04	2.9	3.32	2.96	20%

BU_PBo12_0_OUT	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Mittelwert	COV
F _{2mm,pl.Verf.} [kN]							
F _{5mm} [kN]							
F _{15mm} [kN]							
F _{max} [kN]	101.0	102.1	87.2	102.6	103.9	99.3	3%
K1 [N/mm]	62598	91415	57440	106982	90165	81720	26%
K2 [N/mm]	283037	282691	139449	343036	234728	256588	30%
D [-]	3.43	5.49	2.65	4.30	5.62	4.30	30%

B.6 Tragfähigkeiten und Steifigkeiten der Passbolzenversuche senkrecht zur Faser

BU_PBo12_90_IN	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Mittelwert	COV
F _{2mm,pl.Verf.} [kN]	71.9	72.7	81.4	71.3	69.5	74.3	6%
F _{5mm} [kN]	79.0	---	---	---	80.4	79.7	1%
F _{15mm} [kN]	---	---	---	---	---		
F _{max} [kN]	85.0	77.1	81.4	81.1	91.9	83.3	3%
K1 [N/mm]	47093	90094	67308	261406		116475	84%
K2 [N/mm]	105240	67558	201444	127393		125409	45%
D [-]	3.25	2.82	2.24	3.10	4.59	3.20	27%

BU_PBo12_90_OUT	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Mittelwert	COV
F _{2mm,pl.Verf.} [kN]	---	---	52.3	69.4	69.3	60.8	16%
F _{5mm} [kN]	---	---	---	---	---		
F _{15mm} [kN]	---	---	---	---	---		
F _{max} [kN]	58.4	49.2	57.0	74.3	76.0	63.0	9%
K1 [N/mm]	80660	113896	46877	137002	112054	98098	36%
K2 [N/mm]	410167	583365	280368	558107	364771	439356	29%
D [-]	1.70	7.41	4.36	5.01	5.28	4.75	43%

Anhang C Versagensbilder

C.1 Versuche parallel zur Faser - Stabdübel

C.1.1 Serie 18, $a_1 = 9d$

BU-StD18-8-0-01



BU-StD18-8-0-02



BU-StD18-8-0-03



BU-StD18-8-0-04



BU-StD18-8-0-05



C.1.2 Serie 19, $a_1 = 7d$

BU-StD19-8-0-01



BU-StD19-8-0-02



BU-StD19-8-0-03



BU-StD19-8-0-04



BU-StD19-8-0-05



C.1.3 Serie 20, $a_i = 5d$

BU-StD20-8-0-01



BU-StD20-8-0-02



BU-StD20-8-0-03



BU-StD20-8-0-04

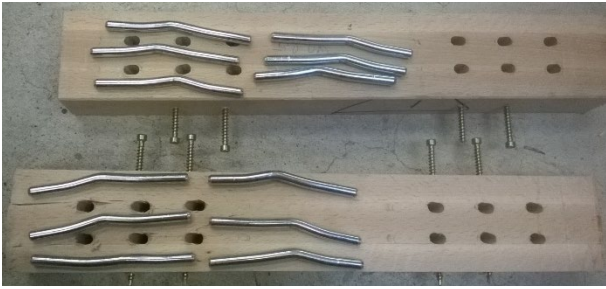


BU-StD20-8-0-05

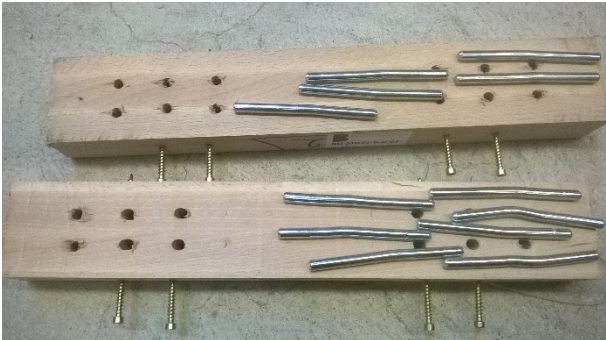


C.1.4 Serie 21, $a_1 = 5d$ verstärkt

BU-StD21-8-0-01



BU-StD21-8-0-02



BU-StD21-8-0-03



BU-StD21-8-0-04



BU-StD21-8-0-05



C.1.5 Serie 22, $m \times n = 1 \times 3$

BU-StD22-8-0-01



BU-StD22-8-0-02



BU-StD22-8-0-03



BU-StD22-8-0-04



BU-StD22-8-0-05



C.1.6 Serie 23, $m \times n = 3 \times 3$

BU-StD23-8-0-01



BU-StD23-8-0-02



BU-StD23-8-0-03



BU-StD23-8-0-04

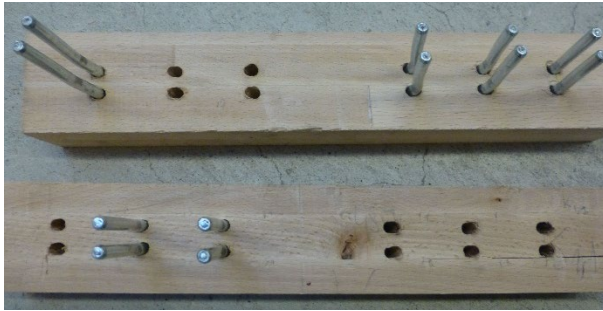


BU-StD23-8-0-05



C.1.7 Serie 24, $a_2 = 2d$

BU-StD24-8-0-01



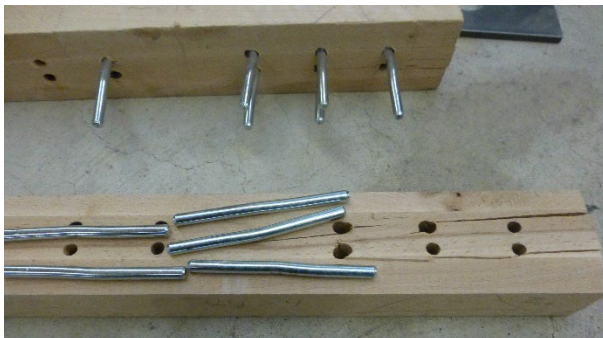
BU-StD24-8-0-02



BU-StD24-8-0-03



BU-StD24-8-0-04



BU-StD24-8-0-05



C.1.8 Serie 26, $a_2 = 4d$

BU-StD26-8-0-01



BU-StD26-8-0-02



BU-StD26-8-0-03



BU-StD26-8-0-04



BU-StD26-8-0-05



C.1.9 Serie 27, $a_3 = 9d$

BU-StD27-8-0-01



BU-StD27-8-0-02



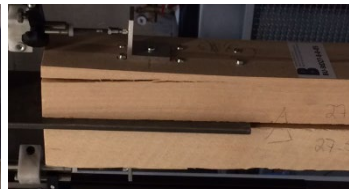
BU-StD27-8-0-03



BU-StD27-8-0-04

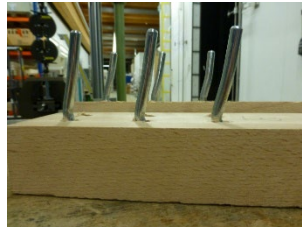


BU-StD27-8-0-05



C.1.10 Serie 29, $a_3 = 5d$

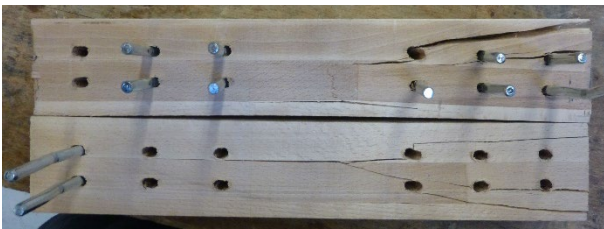
BU-StD29-8-0-01



BU-StD29-8-0-02



BU-StD29-8-0-03



BU-StD29-8-0-04



BU-StD29-8-0-05

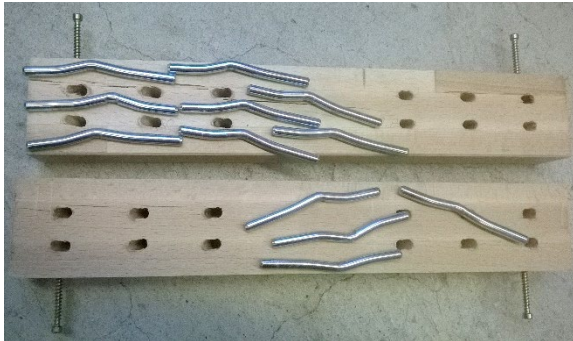


C.1.11 Serie 30, $a_3 = 5d$, verstärkt

BU-StD30-8-0-01



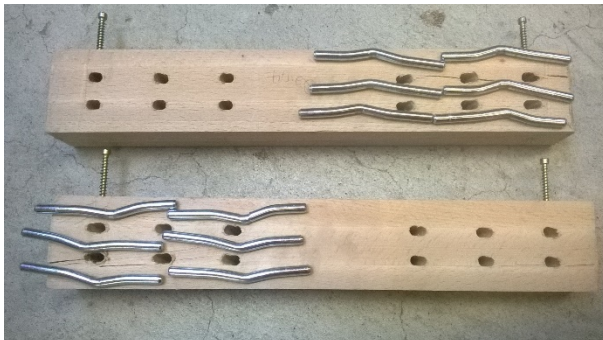
BU-StD30-8-0-02



BU-StD30-8-0-03



BU-StD30-8-0-04



BU-StD30-8-0-05



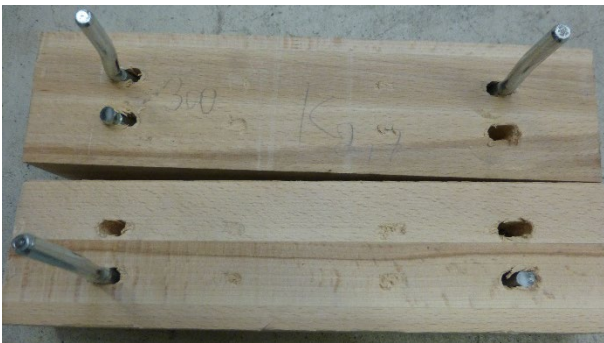
C.1.12 Serie 31, $m \times n = 2 \times 1$, $a_1 = 7d$

BU-StD31-8-0-01

BU-StD31-8-0-02



BU-StD31-8-0-03



BU-StD31-8-0-04



BU-StD31-8-0-05

C.1.13 Serie 33, $m \times n = 2 \times 7$, $a_i = 7d$

BU-StD33-8-0-01



BU-StD33-8-0-02



BU-StD33-8-0-03



BU-StD33-8-0-04



BU-StD33-8-0-05



C.1.14 Serie 34, $m \times n = 2 \times 2$, $a_1 = 9d$

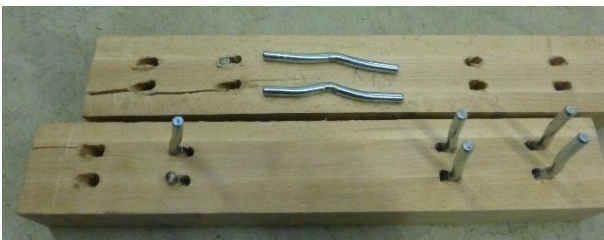
BU-StD34-8-0-01



BU-StD34-8-0-02



BU-StD34-8-0-03



BU-StD34-8-0-04



BU-StD34-8-0-05



C.1.15 Serie 35, $m \times n = 2 \times 3$, $a_i = 9d$

BU-StD35-8-0-01



BU-StD35-8-0-02



BU-StD35-8-0-03



BU-StD35-8-0-04



BU-StD35-8-0-05



C.1.16 Serie 36, $m \times n = 2 \times 5$, $a_1 = 9d$

BU-StD36-8-0-01



BU-StD36-8-0-02

BU-StD36-8-0-03



BU-StD36-8-0-04



BU-StD36-8-0-05

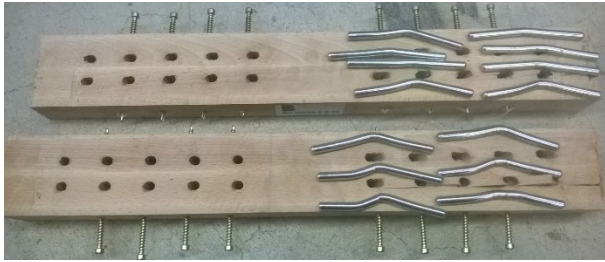


C.1.17 Serie 37, $m \times n = 2 \times 7$, $a_1 = 9d$

Keine Unterlagen

C.1.18 Serie 39, $m \times n = 2 \times 5$, $a_i = 5d$, verstärkt

BU-StD39-8-0-01



BU-StD39-8-0-02



BU-StD39-8-0-03



BU-StD39-8-0-04



BU-StD39-8-0-05



C.1.19 Serie 45, $t = 40$ mm

BU-StD45-8-0-01



BU-StD45-8-0-02



BU-StD45-8-0-03



BU-StD45-8-0-04



BU-StD45-8-0-05



C.1.20 Serie 47, $t = 60$ mm

BU-StD47-8-0-01



BU-StD47-8-0-02



BU-StD47-8-0-03



BU-StD47-8-0-04



BU-StD47-8-0-05

C.1.21 Serie 51, $d = 12$ mm

Keine Unterlagen

C.1.22 Serie 53, $d = 20$ mm

BU-StD53-20-0-01



BU-StD53-20-0-02



BU-StD53-20-0-03



BU-StD53-20-0-05



C.1.23 Prüfserie120

Prüfkörper 120-01

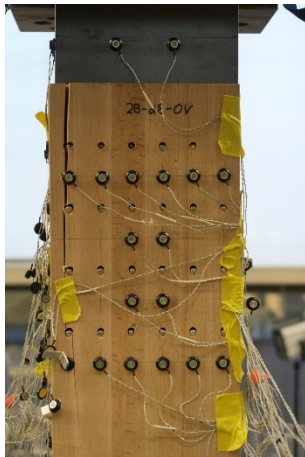
Prüfkörper 120-02



C.1.24 Prüfserie121

Prüfkörper 121-01

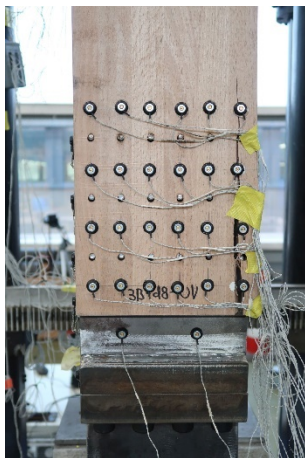
Prüfkörper 121-02



C.1.25 Prüfserie122

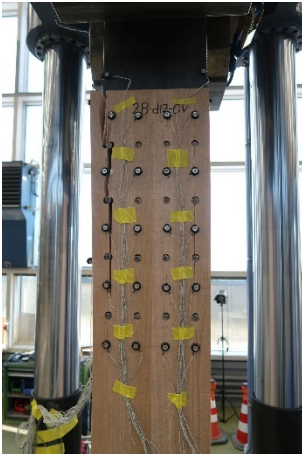
Prüfkörper 122-01

Prüfkörper 122-02

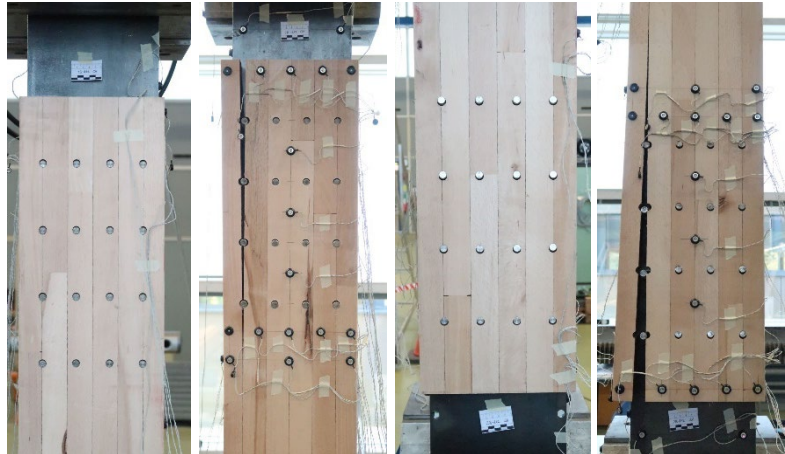


C.1.26 Prüfserie123

Prüfkörper 123-01

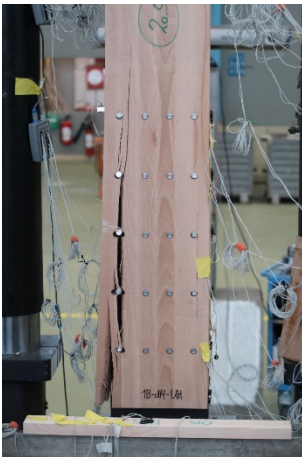


Prüfkörper 123-02

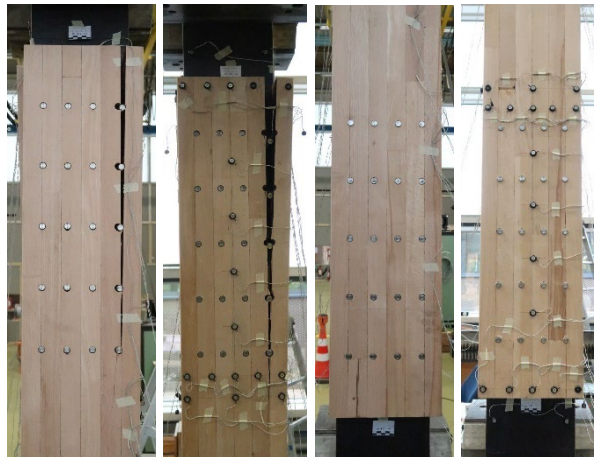


C.1.27 Prüfserie124

Prüfkörper 124-01

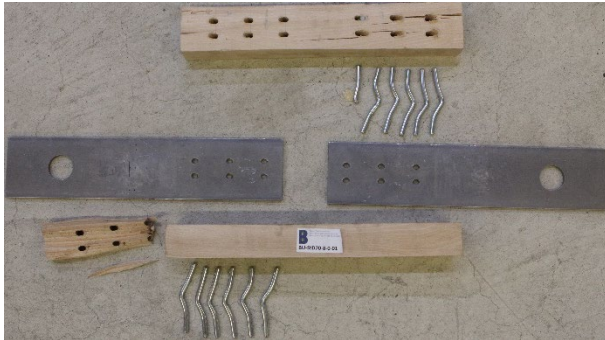


Prüfkörper 124-02



C.1.28 Serie 128

BU_StD_128_8_01



BU_StD_128_8_02



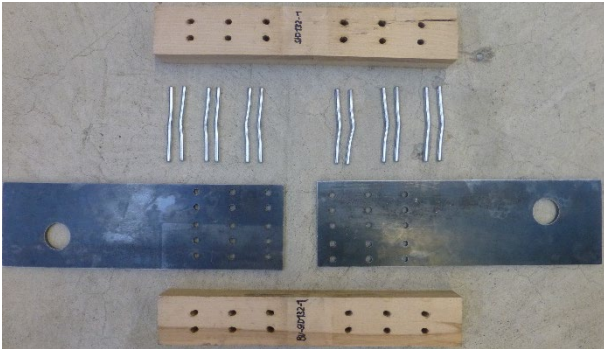
C.1.29 Serie 129

BU_StD_129_8_01



C.1.30 Serie 132

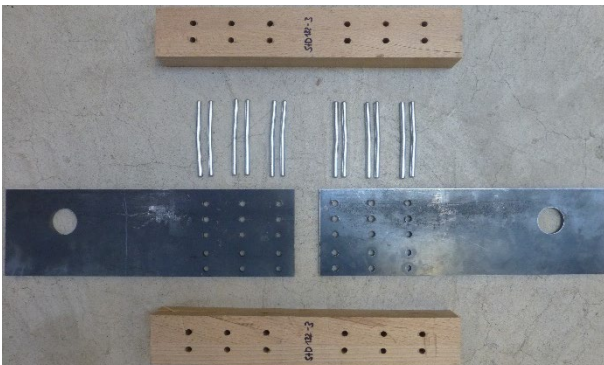
BU_StD_132_8_01



BU_StD_132_8_02



BU_StD_132_8_03



C.2 Vorversuche rechtwinklig zur Faserrichtung

C.2.1 Serie 54, $a_1 = 9d$

BU-StD54-8-90-01



BU-StD54-8-90-02



BU-StD54-8-90-03



BU-StD54-8-90-04

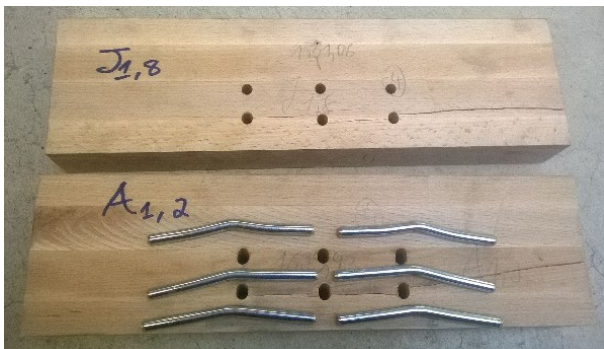


C.2.2 Serie 55, $a_1 = 7d$

BU-StD55-8-90-01



BU-StD55-8-90-02



BU-StD55-8-90-03



BU-StD55-8-90-04

BU-StD55-8-90-05



C.2.3 Serie 56, $a_1 = 5d$

BU-StD56-8-90-01



BU-StD56-8-90-02



BU-StD56-8-90-03



BU-StD56-8-90-04

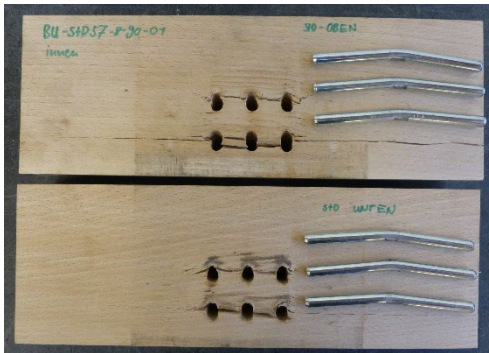


BU-StD56-8-90-05

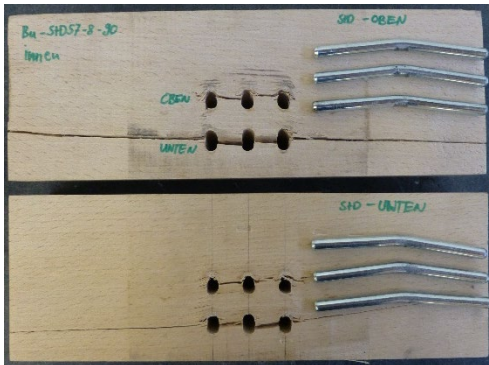


C.2.4 Serie 57, $a_1 = 3d$

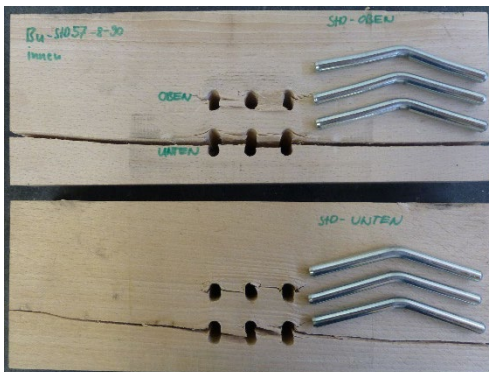
BU-StD57-8-90-01



BU-StD57-8-90-02

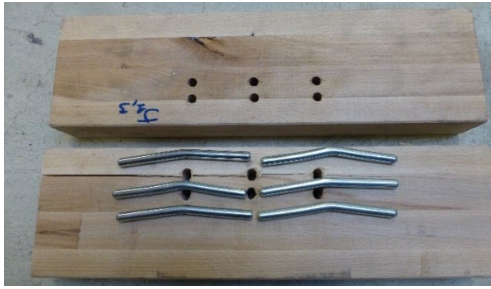


BU-StD57-8-90-03



C.2.5 Serie 58, $a_2 = 2d$

BU-StD58-8-90-01



BU-StD58-8-90-02



BU-StD58-8-90-03



BU-StD58-8-90-04



BU-StD58-8-90-05



C.2.6 Serie 60, $a_2 = 4d$

BU-StD60-8-90-01



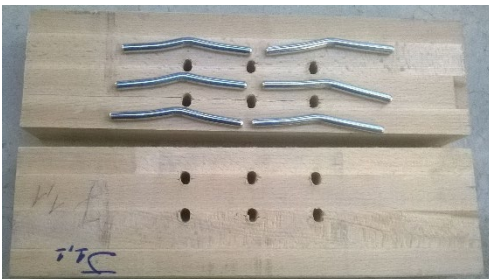
BU-StD60-8-90-02



BU-StD60-8-90-03



BU-StD60-8-90-04



BU-StD60-8-90-05

C.2.7 Serie 61, $t = 30$ mm

BU-StD61-8-90-01



BU-StD61-8-90-02



BU-StD61-8-90-03



BU-StD61-8-90-04



BU-StD61-8-90-05



C.2.8 Serie 62, $t = 50$ mm

BU-StD62-8-90-01



BU-StD62-8-90-02



BU-StD62-8-90-03



BU-StD62-8-90-04



BU-StD62-8-90-05



C.2.9 Serie 63, $t = 20$ mm

BU-StD63-8-90-01



BU-StD63-8-90-02



BU-StD63-8-90-03



BU-StD63-8-90-04



BU-StD63-8-90-05



C.2.10 Serie 67

BU-StD67-12-90-01



BU-StD67-12-90-02



BU-StD67-12-90-03



BU-StD67-12-90-04



BU-StD67-12-90-05



C.2.11 Serie 69

BU-StD69-20-90-01



BU-StD69-20-90-02



BU-StD69-20-90-03



BU-StD69-20-90-04



BU-StD69-20-90-05

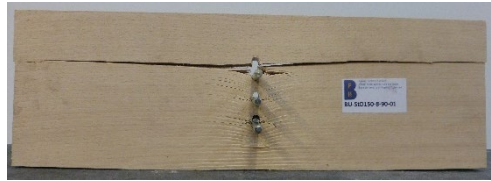


C.2.12 Serie 150

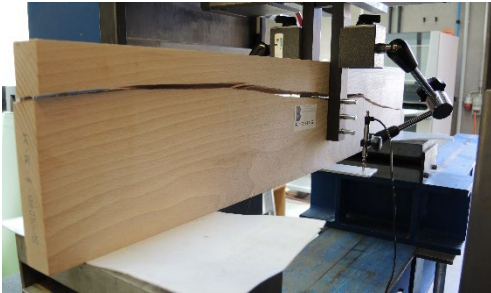
BU-StD150-8-90-01-Biegeversuch



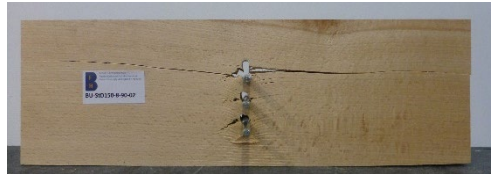
BU-StD150-8-90-01-Druckversuch



BU-StD150-8-90-02-Biegeversuch



BU-StD150-8-90-02-Druckversuch



BU-StD150-8-90-03-Biegeversuch



BU-StD150-8-90-03-Druckversuch



C.2.13 Serie 151

BU-StD151-8-90-01-Biegeversuch



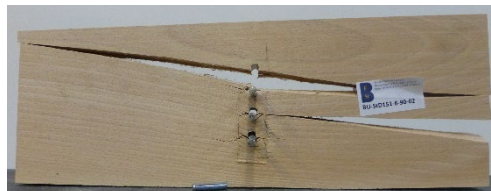
BU-StD151-8-90-01-Druckversuch



BU-StD151-8-90-02-Biegeversuch



BU-StD151-8-90-02-Druckversuch



BU-StD151-8-90-03-Biegeversuch



BU-StD151-8-90-03-Druckversuch

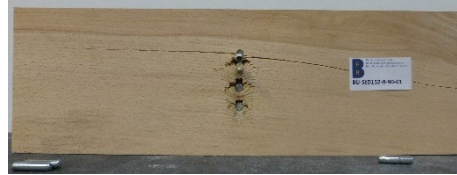


C.2.14 Serie 152

BU-StD1 52-8-90-01-Biegeversuch



BU-StD1 52-8-90-01-Druckversuch



BU-StD1 52-8-90-02-Biegeversuch



BU-StD1 52-8-90-02-Druckversuch



BU-StD1 52-8-90-03-Biegeversuch



BU-StD1 52-8-90-03-Druckversuch



C.2.15 Serie 153

BU-StD1 53-8-90-01-Biegeversuch



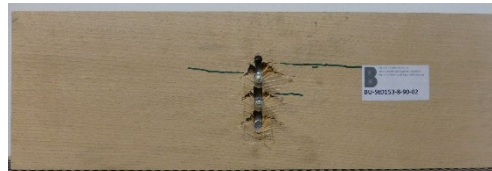
BU-StD1 53-8-90-01-Druckversuch



BU-StD1 53-8-90-02-Biegeversuch



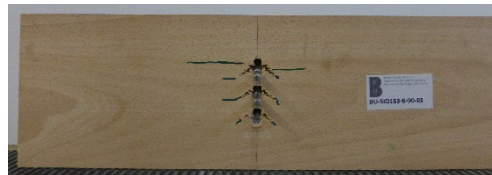
BU-StD1 53-8-90-02-Druckversuch



BU-StD1 53-8-90-03-Biegeversuch



BU-StD1 53-8-90-03-Druckversuch



C.2.16 Serie 154

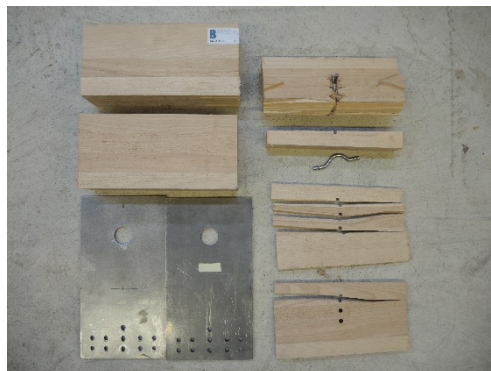
BU-StD154-8-90-01



BU-StD154-8-90-02

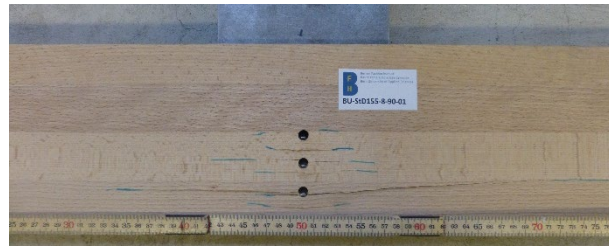


BU-StD154-8-90-03

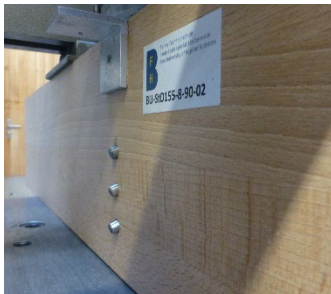


C.2.17 Serie 155

BU-StD155-8-90-01



BU-StD155-8-90-02

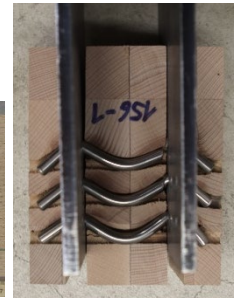


BU-StD155-8-90-03



C.2.18 Serie 156

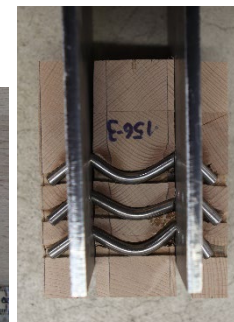
BU-StD156-8-90-01



BU-StD156-8-90-02



BU-StD156-8-90-03

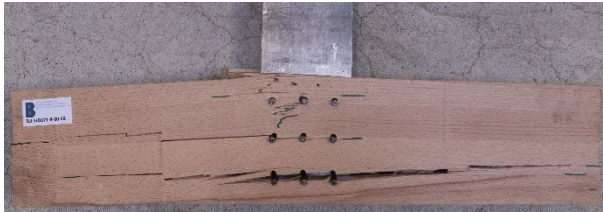


C.2.19 Serie 171

BU-StD171-8-90-01



BU-StD171-8-90-02



BU-StD171-8-90-03



C.2.20 Serie 172

BU-StD172-8-90-01



BU-StD172-8-90-02



BU-StD172-8-90-03



C.2.21 Serie 173

BU-StD173-8-90-01



BU-StD173-8-90-02

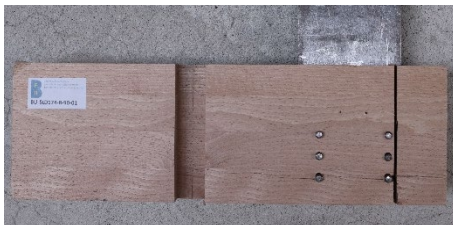


BU-StD173-8-90-03



C.2.22 Serie 174

BU-StD174-8-90-01



BU-StD174-8-90-02

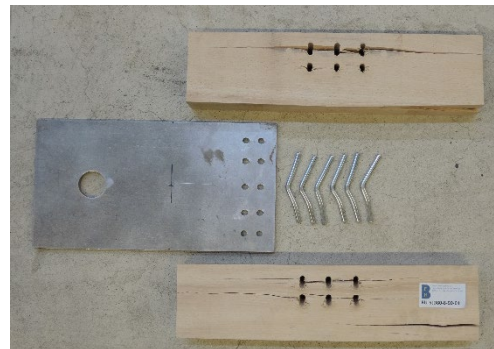


BU-StD174-8-90-03

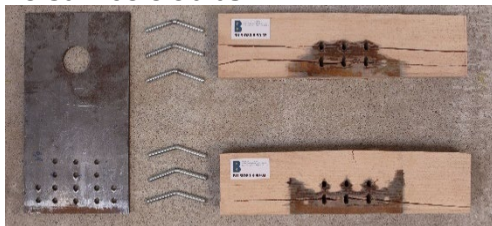


C.2.23 Serie 168

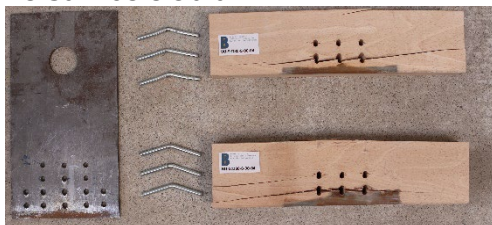
BU-StD168-8-90-01



BU-StD168-8-90-03



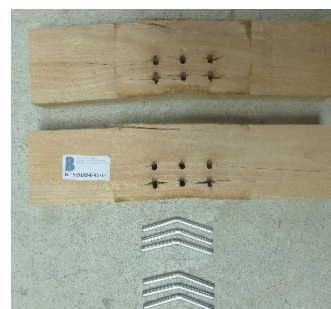
BU-StD168-8-90-04



C.2.24 Serie 169

BU-StD169-8-90-01

BU-StD169-8-90-02



BU-StD169-8-90-03

Modul 2/3, Teil B

Verbindungen mit Schrauben

Andrea Frangi, Robert Jockwer

ETH Zürich, Institut für Baustatik und Konstruktion

Inhaltsverzeichnis

1	INHALTE UND ZIELE DER VERSUCHSSERIEN	5
2	VERSUCHSPROGRAMM	5
2.1	MATERIAL	5
2.1.1	<i>Holz</i>	5
2.1.2	<i>Schrauben</i>	5
2.2	EINBRINGVERSUCHE	7
2.2.1	<i>Allgemein</i>	7
2.2.2	<i>Parameter</i>	9
2.3	AUSZIEHPRÜFUNGEN	10
2.3.1	<i>Testmethode</i>	10
2.3.2	<i>Parameter</i>	10
2.4	SCHERVERSUCHE	13
2.4.1	<i>Versuchskörper und Testmethode</i>	13
2.4.2	<i>Versuchskonfiguration und Parameter</i>	16
3	ERGEBNISSE	17
3.1	EINBRINGVERSUCHE	17
3.1.1	<i>Schrauben SFS WT-T 6.5</i>	17
3.1.2	<i>Schrauben SFS WT-T 8.2</i>	22
3.1.3	<i>Schrauben SFS WR-T 13</i>	27
3.1.4	<i>Schrauben Powerfast 8mm</i>	29
3.1.5	<i>Schrauben Sherpa 8 mm</i>	32
3.1.6	<i>Schrauben Würth 6 mm</i>	37
3.1.7	<i>Schrauben Würth 10 mm</i>	42
3.1.8	<i>Diskussion</i>	47
3.1.9	<i>Einfluss der Schraubenachsen-Faser-Richtung</i>	47
3.1.10	<i>Einfluss der Schraubenform</i>	48
3.2	AUSZIEHPRÜFUNGEN	49
3.2.1	<i>Allgemein</i>	49
3.2.2	<i>Ergebnisse</i>	50
3.2.3	<i>Zusammenfassung</i>	57
3.3	SCHERVERSUCHE	58
3.3.1	<i>Allgemein</i>	58
3.3.2	<i>Ergebnisse</i>	60
3.3.3	<i>Schlussfolgerung</i>	72
4	EMPFEHLUNGEN FÜR DIE BEMESSUNG	73
4.1	ALLGEMEINES	73
4.2	BEANSPRUCHUNG RECHTWINKLIG ZUR SCHAFTRICHTUNG	73
4.3	BEANSPRUCHUNG IN SCHAFTRICHTUNG	75
5	LITERATUR	77

1 Inhalte und Ziele der Versuchsserien

Die Versuche dienen der Untersuchung und Festlegung folgender Parameter:

- Einbringvoraussetzungen für Schrauben, Abgrenzung zwischen den Durchmessern ohne Vorbohren und mit Vorbohren, Berücksichtigung der Einbindelänge
- Minimale und optimale Abstände zwischen Verbindungsmitteln: a_1
- Minimale und optimale Abstände zum beanspruchten Rand: a_3
- Einfluss der Anzahl an Verbindungsmitteln hintereinander: n_{ef}
- Einfluss der minimalen und optimalen Holzdicken: t
- Lochleibungsparameter für Schrauben ohne Vorbohren als orientierende Werte für die Planung der Hauptversuche
- Ausziehparameter für Schrauben und Gewindestangen als Werte für die Planung der Hauptversuche und Bemessungsmethoden

2 Versuchsprogramm

Das genauere Versuchsprogramm wurde im Rahmen der definitiven Versuchsplanung entworfen.

2.1 Material

2.1.1 Holz

Für die Versuche wurde Buchen BSH sowie an der BFH Biel zugeschnittene Buchen Lamellen verwendet. Für die Ausziehprüfungen wurden Buchen Lamellen an der ETH Zürich zum Teil zu Elementen mit grösseren Abmessungen verklebt.

2.1.2 Schrauben

Die in Tabelle 1 Schrauben und Gewindestangen der Firmen SFS, Würth und Sherpa wurden in den Versuchen und Tests untersucht.

Tabelle 1: Materialeigenschaften des Buchen-BSH und der Buchenlamellen

Hersteller	Bezeichnung	Nenndurchmesser [mm]	Länge [mm]
SFS	WT-T	6.2	220
	Powerfast	8	220
	WT-T	8.5	160
	WT-T	8.5	220
	WR-T	13	400
	WB	16	Stangenware
	WB	20	Stangenware
Würth	Assy	6	160
	Assy	6	220
	Assy	8	160
	Assy	10	160
	Assy	10	260
	Assy	14	800
Sherpa		8	180

Eine Übersicht über die verschiedenen Schrauben ist in Abbildung 1 gegeben.

SFS WR-T und WT-T



SFS Powerfast



Würth Assy VG



Sherpa



Abbildung 1: Übersicht über die verwendeten Schrauben.

2.2 Einbringversuche

2.2.1 Allgemein

Für das Einbringen von selbstbohrenden Schrauben sind zwei Dinge von großer Bedeutung: die Leichtigkeit des Einbringens zu Beginn des Einschraubvorgangs und das maximale Torsionsmoment während des Einschraubvorgangs, welches typischerweise beim Auftreffen des Schraubenkopfes aufs Holz auftritt.

Gemäss EN 14592:2008 muss der Torsionswiderstand beim Eindrehen in Holz $R_{\text{tor},k}$ (Eindrehmoment [Nmm]) kleiner als $2/3$ der charakteristischen «Torsionsfestigkeit» $f_{\text{tor},k}$ (Torsionsmomententragfähigkeit [Nmm]) der Schraube sein, damit die Schraube während des Einschraubvorgangs nicht bricht oder überbeansprucht wird (auch in Bezug auf die spätere Beanspruchungen). Durch Vorbohren der Schraube kann das Eindrehmoment reduziert werden.

Die Beurteilung der Leichtigkeit des Einbringens der Schrauben zu Beginn des Einschraubvorgangs konnte nicht objektiv gemessen werden, sondern war eher eine subjektive Bewertung, die stark vom Anwender, den verfügbaren Werkzeugen und der Vorbereitung der Holzoberfläche abhängt. Die große Vielfalt an verschiedenen Schrauben mit unterschiedlicher Schraubenspitze führt zu unterschiedlichen Einschrauberfahrungen. Um einen einfachen Start des Einschraubvorgangs zu ermöglichen, sollte eine schlanke und spitze Form der Schraubenspitze gegenüber einer stumpfen Form, wie in Abbildung 2 dargestellt, bevorzugt werden. Ein kurzes Vorbohren von Löchern von wenigen Zentimetern Tiefe vereinfacht den Einschraubvorgang erheblich: Sobald das Gewinde der Schraube ausreichend im Holz verankert ist, zeigen alle Schrauben ein gutes Einschraubverhalten.



Abbildung 2: Ausbildung der Schraubenspitzen von SFS WT-T (links) und Würth Assy VG (rechts) Schrauben.

2.2.1.1 Versuchseinrichtung zur Messung des Drehmoments

Zur Bestimmung des Einschraubdrehmoments wurde ein Akku-Schlagbohrschrauber ASB18 M 72 der Firma Mafell verwendet (Abbildung 3). Dieser ist in der Lage ein Drehmoment von bis zu 44 Nm für einen weichen Schraubfall (ohne Schlag) aufzubringen und verfügt über mehrere Drehmomenteinstellungen sowie zwei Gänge. Des Weiteren wurde ein Drehmomentvorsatz A-DMV $\times 3$ der Firma Mafell verwendet (Abbildung 4). Dieser verfügt über eine Untersetzung von 3:1 und ermöglicht das Aufbringen höherer Drehmomente beim Einschrauben. Des Weiteren erhöht der Drehmomentaufsatz die Kontrolle über Schrauber sowie die Arbeitssicherheit.



Abbildung 3: Mafell Akku-Schlagbohrschrauber ASB18 M 72

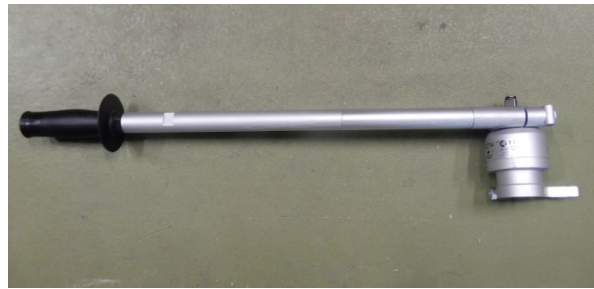


Abbildung 4: Mafell Drehmomentvorsatz A-DMV $\times 3$

Die Messdaten wurden mit Hilfe des Drehmomentsensors Serie 3000 der Firma NCTE gemessen (Abbildung 5). Das Nenndrehmoment dieses Sensors ist mit 100 Nm angegeben sowie die maximale Überlast bei 150 Nm. Die Drehzahl wird mit 10000 U/min angegeben, wobei die Messabweichung bezogen auf den Endwert der Messung laut Hersteller bei 0.2% liegen soll.

Der zusammengestellte Schrauber mit Drehmomentaufsatz und Drehmomentsensor ist in Abbildung 6 zu sehen. Die Messdaten können direkt mit einem Laptop ausgelesen und aufgezeichnet werden. Die folgenden Messgrößen können aufgezeichnet werden:

- Drehmoment
- Zeit
- Drehgeschwindigkeit
- Drehwinkel des Schrauberkopfes

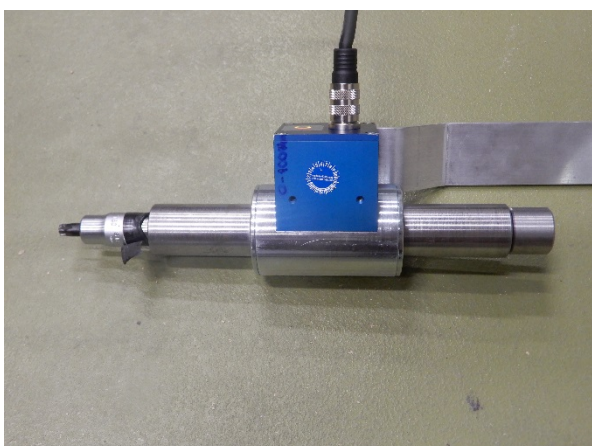


Abbildung 5: NCTE Drehmomentsensor Serie 3000



Abbildung 6: Akku-Schrauber mit Drehmomentaufsatz und Drehmomentsensor

2.2.1.2 Versuchsdurchführung

Falls Schrauben in vorgebohrte Löcher eingeschraubt wurden, so wurden diese Löcher erst kurz vor dem Einschrauben vorgebohrt. Es wurde ausserdem darauf geachtet alle Versuche in demselben Prüfkörper durchzuführen.

Die Messung der Torsionsfestigkeit der Schraube kann gemäss Norm EN ISO 10666 erfolgen. Dazu soll das Gewinde in einer Vorrichtung platziert werden, ohne dass der eingespannte Teil des Gewindes beschädigt wird. Des Weiteren sollen mindestens zwei Gewindegänge nicht eingespannt sein und mindestens zwei Gewindegänge sollen sich innerhalb der Einspannvorrichtung befinden. Im vorliegenden Fall wurden die Schrauben in einen Schraubstock eingespannt. Der Bruch trat typischerweise im Gewindebereich in der Nähe des Schraubenkopfes auf.



Abbildung 7: Einspannung einer Schraube zur Ermittlung des Bruchdrehmoments



Abbildung 8: Schraube des Herstellers Würth nach der Versuchsdurchführung

Im Rahmen dieser Studie wurde das mittlere Bruchdrehmoment und nicht das charakteristische Bruchdrehmoment verwendet. Trotz der vorliegenden geringen Streuung der Bruchdrehmomente liegt die Herausforderung in der Bestimmung eines zuverlässigen charakteristischen Wertes aus den Versuchsdaten, da dafür vor allem eine repräsentative Probennahme der Grundgesamtheit erfolgen muss. Eine zuverlässigere Bestimmung des charakteristischen Wertes des Bruchdrehmoments erfordert die Analyse einer grösseren Anzahl Schrauben aus verschiedenen Produktionschargen, da innerhalb einer Charge die Werte sehr ähnlich sind, aber zwischen den Chargen relativ grosse Schwankungen auftreten können.

2.2.2 Parameter

Die folgenden Parameter werden in den Einbringversuchen untersucht:

- ohne/mit Vorbohren bzw. erforderlicher Vorbohrdurchmesser
- Max. Einbindelänge
- Einschraubwinkel

Des Weiteren ist die Aufzeichnung des Einschraubdrehmoments gemäss EN 15737 durchgeführt.

2.3 Ausziehprüfungen

2.3.1 Testmethode

Die Testmethode für die Ausziehprüfungen erfolgt in Anlehnung an EN 1382. In Abbildung 9 der Prüfaufbau schematisch und im Bild dargestellt.

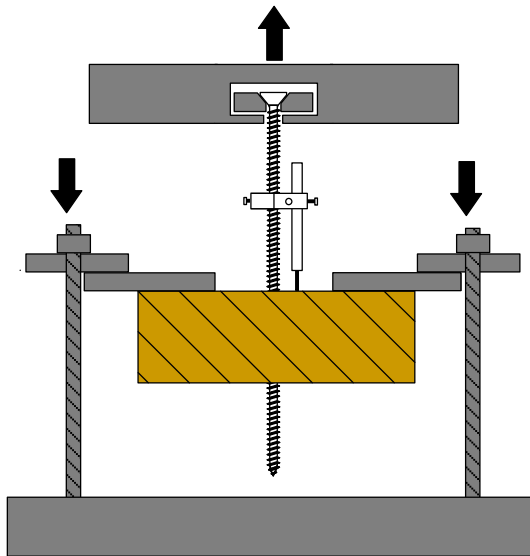


Abbildung 9: Schematische Darstellung und Abbildung des Prüfaufbaus für die Ausziehprüfungen.

Als Prüfgerät diente die Universalprüfmaschine Schenck 480 kN des Herstellers Instron Deutschland GmbH der Bauhalle des DBAUG der ETH Zürich. Dieses vermag statisch 480 kN Druck oder Zug auf einem Weg von 125 mm aufzubringen.

Der RDP Wegaufnehmer D5/200AG der RDP Electronics vom Typ LDC 1000C weist einen Messbereich von -5 mm bis 5 mm auf.

Die Distanz zwischen dem Mittelpunkt der Halterung und der PK-Oberfläche wurde beim Einbau zu 49 mm gemessen.

2.3.2 Parameter

Die folgenden Parameter werden in den Prüfungen untersucht:

- Vorbohrdurchmesser
- Einschraubwinkel
- Einschraublänge

Das Prüfprogramm ist in den folgenden Tabellen aufgeführt. Je nach Ergebnissen wird das Programm individuell angepasst.

SFS

Nr.	d	Vorbohrung	Einbinde- länge	Kraftfaser- winkel	Anzahl VM	Anzahl Versuche
1	6.5	Ohne	6 d	0°	1	5
2	6.5	1.0 d	6 d	0°	1	5
3	6.5	Ohne	6 d	90°	1	5
4	6.5	1.0 d	6 d	90°	1	5
5	8.2	Ohne	6 d	0°	1	5
6	8.2	0.95 d	6 d	0°	1	5
7	8.2	0.80 d	5 d	0°	1	1
8	8.2	0.85 d	5 d	0°	1	1
9	8.2	0.91 d	5 d	0°	1	1
10	8.2	0.94 d	5 d	0°	1	1
11	8.2	1.00 d	5 d	0°	1	1
12	8.2	1.06 d	5 d	0°	1	1
13	8.2	1.09 d	5 d	0°	1	1
14	8.2	1.15 d	5 d	0°	1	1
15	8.2	1.20 d	5 d	0°	1	1
16	8.2	Ohne	6 d	90°	1	5
17	8.2	0.95 d	6 d	90°	1	5
18	8.2	0.80 d	7 d	90°	1	1
19	8.2	0.85 d	7 d	90°	1	1
20	8.2	0.91 d	7 d	90°	1	1
21	8.2	0.94 d	7 d	90°	1	1
22	8.2	1.00 d	7 d	90°	1	1
23	8.2	1.06 d	7 d	90°	1	1
24	8.2	1.09 d	7 d	90°	1	1
25	8.2	1.15 d	7 d	90°	1	1
26	8.2	1.20 d	7 d	90°	1	1
27	13	0.95 d	6 d	0°	1	8
28	13	1.0 d	6 d	0°	1	5
29	13	0.95 d	6 d	90°	1	5
30	13	1.05 d	6 d	90°	1	5
31	16	1.0 d	6 d	0°	1	5
32	16	1.05 d	6 d	0°	1	5
33	16	1.0 d	6 d	90°	1	5
34	16	1.05 d	6 d	90°	1	5
35	20	1.0 d	6 d	0°	1	5
36	20	1.05 d	6 d	0°	1	5
37	20	1.0 d	7.5 d	90°	1	6
38	20	1.05 d	7.5 d	90°	1	6
39	8	Ohne	6 d	0°	1	5
40	8	0.95 d	6 d	0°	1	5
41	8	Ohne	6 d	90°	1	5
42	8	0.95 d	6 d	90°	1	5

Würth

Nr.	d	Vorbohrung	Einbinde- länge	Kraftfaser- winkel	Anzahl VM	Anzahl Versuche
1	6	ohne	6 d	0°	1	5
2	6	1.05 d	6 d	0°	1	5
3	6	ohne	6 d	15°	1	5
4	6	1.05 d	6 d	15°	1	5
5	6	ohne	6 d	30°	1	5
6	6	1.05 d	6 d	30°	1	5
7	6	ohne	6 d	45°	1	5
8	6	1.05 d	6 d	45°	1	5
9	6	ohne	6 d	90°	1	5
10	6	1.05 d	6 d	90°	1	5
11	10	ohne	6 d	0°	1	6
12	10	1.15 d	6 d	0°	1	6
13	10	1.15 d	6 d	15°	1	6
14	10	1.15 d	6 d	30°	1	6
15	10	1.15 d	6 d	45°	1	6
16	10	ohne	6 d	90°	1	6
17	10	0.95 d	6 d	90°	1	6
18	10	1.05 d	6 d	90°	1	6
19	10	1.15 d	6 d	90°	1	6
20	14	1.05 d	4 d	0°	1	5
21	14	1.05 d	6 d	0°	1	5
22	14	1.05 d	10 d	0°	1	5
23	14	1.05 d	4 d	90°	1	5
24	14	1.05 d	7 d	90°	1	5
25	14	1.05 d	11 d	90°	1	2

Sherpa

Nr.	d	Vorbohrung	Einbinde- länge	Kraftfaser- winkel	Anzahl VM	Anzahl Prüfungen
1	8	Ohne	5d	0°	1	6
2	8	0.95 d	5d	0°	1	6
3	8	Ohne	10d	0°	1	9
4	8	0.95 d	10d	0°	1	9
5	8	Ohne	5d	37°	1	5
6	8	0.95 d	5d	37°	1	5
7	8	Ohne	7.5d	37°	1	5
8	8	0.95 d	7.5d	37°	1	5
9	8	Ohne	5d	45°	1	5
10	8	0.95 d	5d	45°	1	5
11	8	Ohne	7.5d	45°	1	5
12	8	0.95 d	7.5d	45°	1	5
13	8	Ohne	5d	90°	1	5
14	8	0.95 d	5d	90°	1	5
15	8	Ohne	6d	90°	1	5
16	8	1.05 d	6d	90°	1	5
17	8	Ohne	10d	90°	1	5
18	8	0.95 d	10d	90°	1	5

2.4 Scherversuche

2.4.1 Versuchskörper und Testmethode

Die Scherversuche werden als Laschenstöße in Zug-Zug-Konfiguration in Anlehnung an EN 1380 und EN 26891 getestet (Abbildung 10). Je zwei Lamellen (Mittelhölzer) wurden mittels zweier Seitenhölzer verbunden.

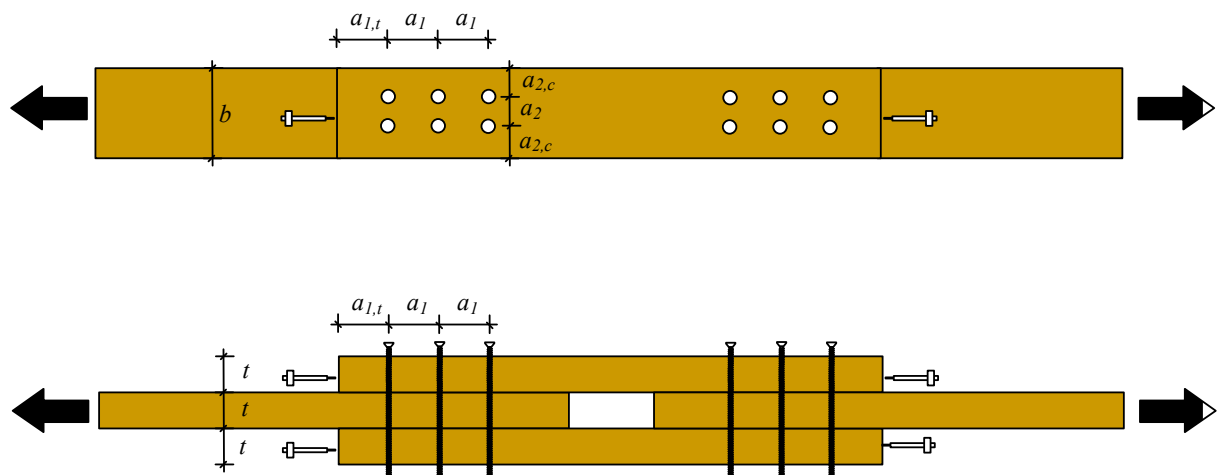


Abbildung 10: Darstellung der Versuchskörper mit Bezeichnungen für die Scherversuche.

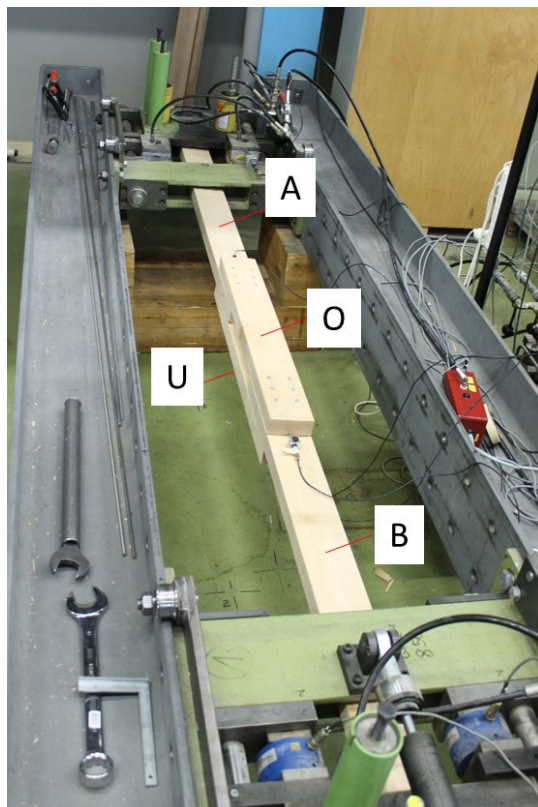


Abbildung 11: Versuchsaufbau und Bezeichnung der Holzteile A, B, O, U der Scherversuche.

Die Versuche wurden in der kleinen horizontal Zugmaschine an der ETH Zürich durchgeführt Abbildung 11.

Die Prüfkörper bestanden aus ca. 50 mm dicken Vollholzlamellen. Bei der Auswahl der Lamellen wurde darauf geachtet, dass alle Lamellen die gleiche Dicke haben. Mögliche Schwindrisse, Äste oder starke Faserabweichungen wurden entfernt. Es stellte sich die Herausforderung aus den vorhandenen Lamellen Prüfkörper ausreichender Dimensionen mit vergleichbarer Rohdichte zusammenzustellen.

Der Zusammenbau der Prüfkörper erfolgte wie folgt:

1. Anzeichnen der Schraubenpositionen (entsprechend der Rand- und Zwischenabständen)
2. Zusammenstellung und Ausrichtung der Lamellen sowie Fixierung mittels Schraubzwingen
3. Markierung der Bohrlöcher mittels Dorn
4. Bohren der Schraubenlöcher mit Handbohrmaschine und Bohrschablone
5. Einschrauben der Schrauben mittels Akkuschauber
6. Lösen der Schraubzwingen

2.4.1.1 Versuchsaufbau und Messungen

Die Versuche wurden lastgesteuert in der Horizontal-Zugmaschine an der ETH Zürich durchgeführt. Die Last wird durch zwei Öldruckgesteuerte Zylinder an einem Ende des Prüfkörpers aufgebracht. Der Maschinenweg wird ebenfalls an diesem Ende des Prüfkörpers gemessen. Am gegenüberliegenden, fixierten Ende des Prüfkörpers wird die Kraft durch zwei Kraftmessdosen gemessen.

Die Kraftmessdosen (Interface 1221 LS) haben einem Messbereich bis 250 kN. Die Wegaufnehmer (LVDT, RDP Electronics LDC 1000C) für den Maschinenweg haben einen Messbereich von ca. ± 25 mm.

Die individuelle Verschiebung zwischen Mittel- und Seitenhölzern wurde bis zu einer Belastung von ca. $0,4 F_{\text{est}}$ aufgezeichnet. Über dieses Belastungsniveau hinaus wurden die LVDT entfernt und nur die gesamte Verformung (Maschinenweg) am Ende beider Mittelhölzer aufgezeichnet. Diese Verformung enthält die Verschiebung beider Verbindungen.

2.4.1.2 Versuchsablauf

Da ein Widerbelastungszyklus mit der Horizontalprüfmaschine nicht möglich ist wurde die Kraft mit einer Unterbrechung bei ca. $0,4 F_{\text{est}}$ konstant gesteigert. Im Kraft-Zeit Diagramm in Abbildung 12 ist der Belastungsverlauf ersichtlich. Beim Starten des Belastungszyklus trat ein Druckstoss bis ca. 3-4 kN auf. Auf dem Belastungsplateau bei ca. $0,4 F_{\text{est}}$ bleibt die Last konstant und die Taster konnten demontiert werden. Nach Erreichen der Maximallast wurde der Versuch gestoppt.

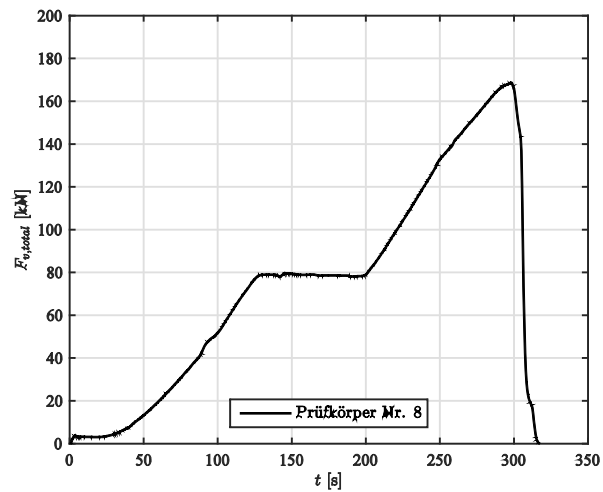


Abbildung 12: Kraft-Zeit Verlauf für Prüfkörper Nr. 8

2.4.2 Versuchskonfiguration und Parameter

In Scherversuchen wurden die Auswirkungen der folgenden Parameter ermittelt:

- Zwischenabstand parallel zur Faser a_1
- Endabstand parallel zur Faser a_3
- Zwischenabstand rechtwinklig zur Faser a_2
- Randabstand rechtwinklig zur Faser a_4
- Effektive Anzahl der Verbindungselemente n_{ef}

Auf Grundlage des Vorversuchsplans wurde der folgende Versuchsplan entworfen:

Tabelle 2: Konfiguration der Prüfkörper für die Scherversuche

Reihe und Prüfkörper-Nr.	d [mm]	a_1 [d]	a_3 [d]	a_2 [d]	a_4 [d]	b [mm]	t [mm]	$m \times n$ [-]	#
SFS WT-T									
Serie 1: 1,2	8.2	6	10	7.3	3.5	117	50	2x3	2
Serie 2: 3,4	8.2	6	10	4.8	4.8	117	50	2x3	2
Serie 3: 5,6	8.2	6	10	3.5	5.3	117	50	2x3	2
Serie 4: 7,8	8.2	5	10	4.8	4.8	117	50	2x3	2
Serie 5: 9,10	8.2	6	7	4.8	4.8	117	50	2x3	2
Serie 6: 11,12	8.2	6	10	3.5	3.5	88	50	2x3	2
Serie 7: 13,14	8.2	6	10	4.0	5.1	117	50	2x3	2
Serie 8: 15,16	8.2	6	10	4.7	3.0	88	50	2x3	2
Würth ASSY Plus VG									
Serie 9: 17,18	6	6	10	4.0	4.0	72	50	2x1	2
Serie 10: 19,20	6	6	10	4.0	4.0	72	50	2x2	2
Serie 11: 21-25	6	6	10	4.0	4.0	72	50	2x3	5
Serie 12: 26,27	6	6	10	4.0	4.0	72	50	2x4	2
Serie 13: 28,29	6	6	10	4.0	4.0	72	50	2x5	2
Serie 14: 30-34	8	6	10	3.5	3.5	88	50	2x3	5
Serie 15: 35-39	10	6	10	3.9	3.9	117	50	2x3	5

3 Ergebnisse

3.1 Einbringversuche

3.1.1 Schrauben SFS WT-T 6.5

Tabelle 3: Geometrie und Vorbohrdurchmesser der Schrauben SFS WT-T 6.5

Schraubentyp	d mm	d_1 mm	d_{drill} mm	d_{drill}/d
SFS WT-T	6.5	4	4.0	1.0



Abbildung 13: Schrauben SFS WT-T 6.5

3.1.1.1 Bruchdrehmoment

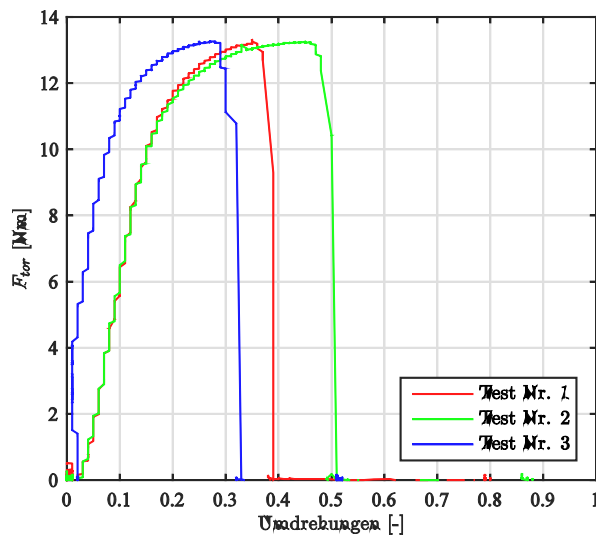


Abbildung 14: Schrauben SFS WT-T 6.5, Bruchdrehmoment.

Tabelle 4: Bruchdrehmomente der Schrauben SFS WT-T 6.5

Schraubentyp		f_{tor} Nm	$f_{\text{tor,mean}}$ Nm	$f_{\text{tor,k}}$ Nm
WT-T	Versuch	13.30		
		13.26		
		13.26		
			13.3	
ETA-12/0063				12.7

3.1.1.2 Einschraubdrehmoment rechtwinklig zur Faser

Schrauben ohne Vorbohrung weisen ein deutlich höheres Drehmoment auf als die vorgebohrten Schrauben. Des Weiteren erreicht keine der Verläufe des Drehmoments den Wert des Bruchdrehmoments der Schraube. Weil die Schraube einen Zylinderkopf besitzt, ist der maximale Einschraubwiderstand beim Auftreffen des Schraubenkopfes aufs Holz deutlich weniger stark ausgeprägt als bei Schrauben mit (Senk-)Kopf. Aufgrund des Doppelgewindes steigt das Drehmoment mit zunehmender Eindringtiefe stetig an und verharrt nicht auf einem konstanten Wert. Ausserdem erkennt man bei den nicht vorgebohrten Versuchen eine wellenförmige Variation des Drehmomentes, das mit der Position der Lamellen übereinstimmt.

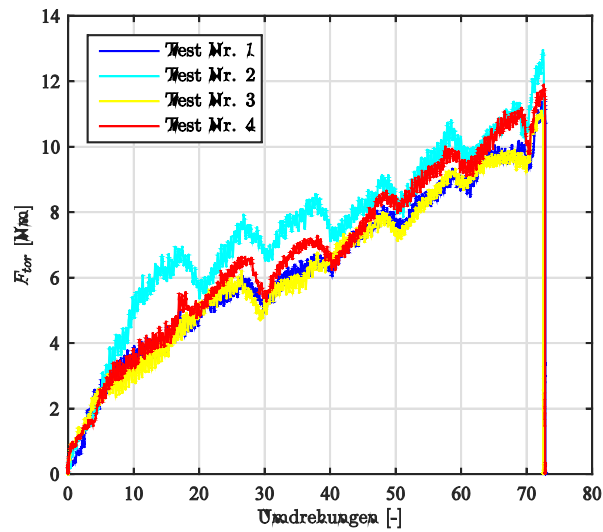


Abbildung 15: Schrauben SFS WT-T 6.5, Vorbohrung $d_{drill} = 0$, Einschraubrichtung rechtwinklig zur Faser 90° .

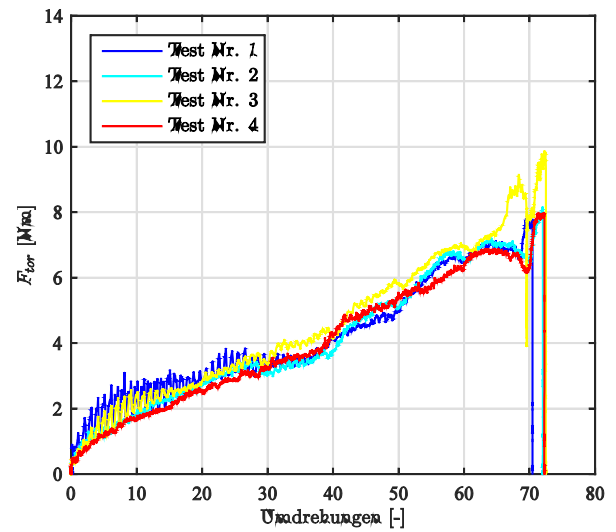


Abbildung 16: Schrauben SFS WT-T 6.5, Vorbohrung $d_{drill} = 4.0$ mm, Einschraubrichtung rechtwinklig zur Faser 90° .

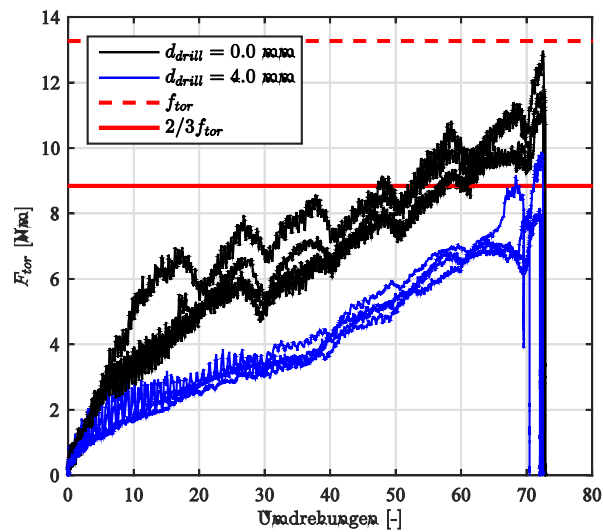


Abbildung 17: Schrauben SFS WT-T 6.5, Einschraubrichtung rechtwinklig zur Faser 90° , Vergleich der Vorbohrung $d_{drill} = 0$ und $d_{drill} = 4.0$ mm.

3.1.1.3 Einschraubdrehmoment parallel zur Faser

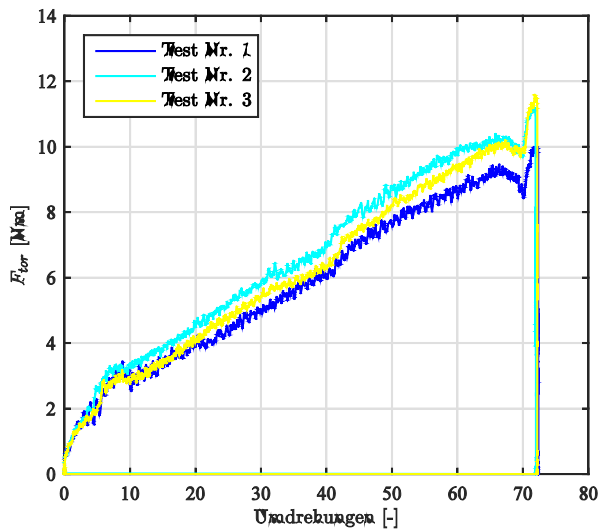


Abbildung 18: Schrauben SFS WT-T 6.5, Vorbohrung $d_{drill} = 0$, Einschraubrichtung parallel zur Faser 0° .

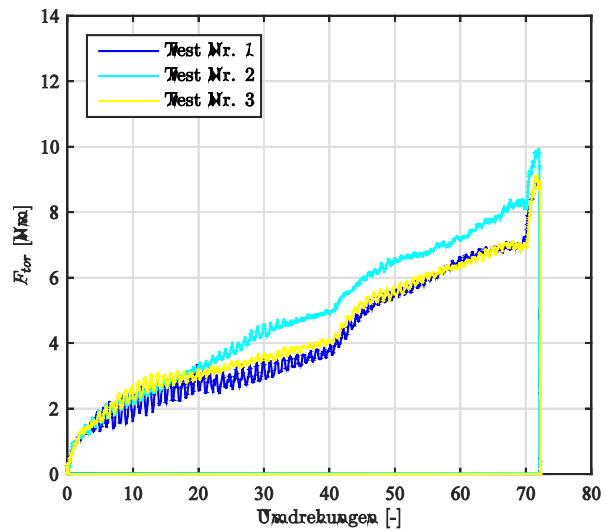


Abbildung 19: Schrauben SFS WT-T 6.5, Vorbohrung $d_{drill} = 4.0$ mm, Einschraubrichtung parallel zur Faser 0° .

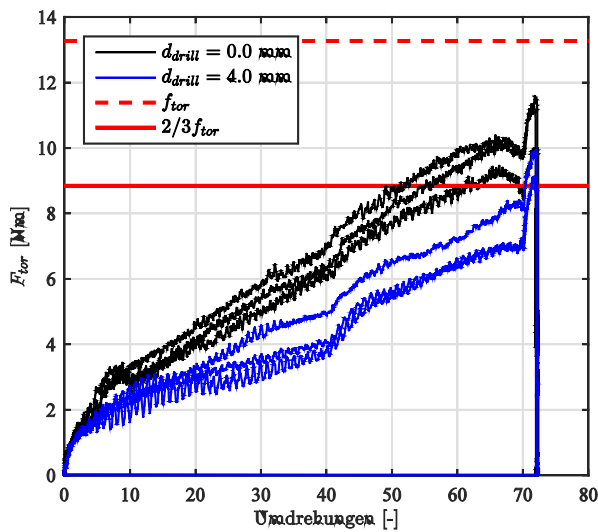


Abbildung 20: Schrauben SFS WT-T 6.5, Einschraubrichtung parallel zur Faser 0° , Vergleich der Vorbohrung $d_{drill} = 0$ und $d_{drill} = 4.0$ mm.

3.1.1.4 Vergleich

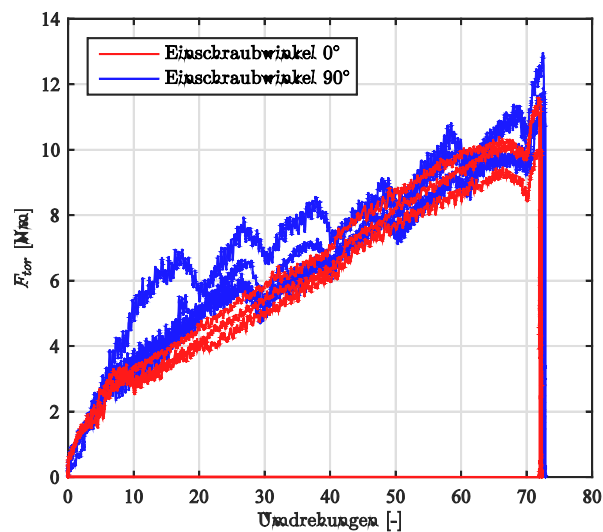


Abbildung 21: Schrauben SFS WT-T 6.5, Vorbohrung $d_{drill} = 0$, Vergleich der Einschraubrichtung parallel zur Faser 0° und rechtwinklig zur Faser 90° .

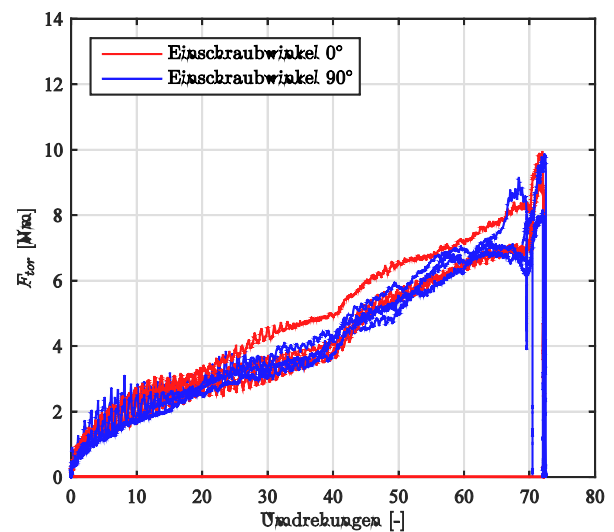


Abbildung 22: Schrauben SFS WT-T 6.5, Vorbohrung $d_{drill} = 4.0 \text{ mm}$, Vergleich der Einschraubrichtung parallel zur Faser 0° und rechtwinklig zur Faser 90° .

3.1.2 Schrauben SFS WT-T 8.2

Tabelle 5: Geometrie und Vorbohrdurchmesser der Schrauben SFS WT-T 8.2

Schraubentyp	d mm	d_1 mm	d_{drill} mm	d_{drill}/d
SFS WT-T	8.2	5.4	5.0	0.93

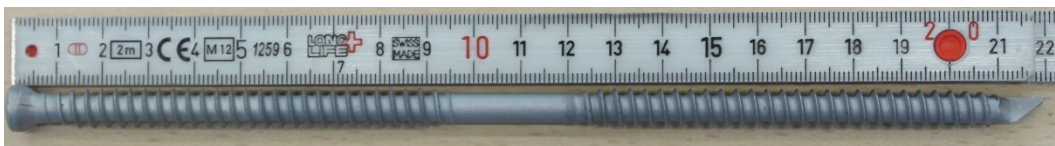


Abbildung 23: Schrauben SFS WT-T 8.2

3.1.2.1 Bruchdrehmoment

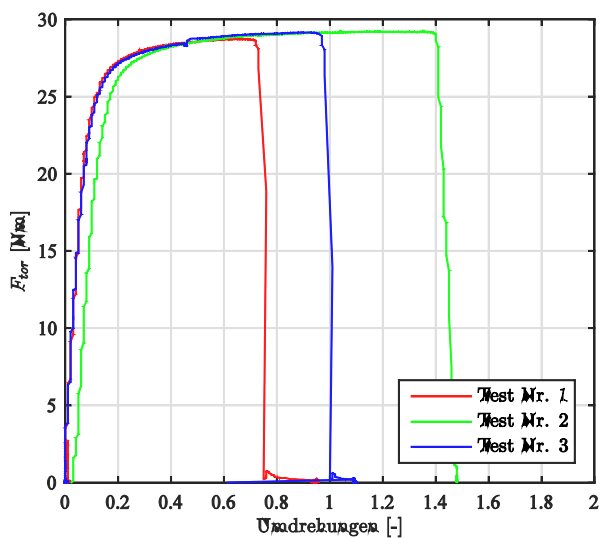


Abbildung 24: Schrauben SFS WT-T 8.2, Bruchdrehmoment.

Tabelle 6: Bruchdrehmomente der Schrauben SFS WT-T 8.2

Schraubentyp		f_{tor} Nm	$f_{\text{tor,mean}}$ Nm	$f_{\text{tor,k}}$ Nm
WT-T	Versuch	28.8		
		29.3		
		29.2		
			29.1	
ETA-12/0063				25.9

3.1.2.2 Einschraubdrehmoment rechtwinklig zur Faser

Die Drehmomente der Versuche ohne Vorbohrung liegen deutlich über denjenigen mit Vorbohrung. Bei den Verläufen der Drehmomente ohne und mit Vorbohrung sind spezifische Abschnitte zu erkennen. Anhand der Gewindehöhe von 3.5 mm kann man feststellen, dass das erste Gewinde bei ca. 27 Umdrehungen endet. In Abbildung 25 und Abbildung 26 folgt nach diesen 27 Umdrehungen eine Art Plateau, das dem glatten Teil des Schafts entspricht. Beim Eindringen des zweiten Gewindes steigt das Drehmoment schliesslich wieder an und endet mit dem wenig ausgeprägten Spitzenwiderstand aus dem Versenken des Zylinderkopfes. Laut Gewindehöhe sollten die Schraube nach 63 Umdrehungen komplett eingedrungen sein. Aufgrund des Versenkens des Schraubenkopfes wurden hier bei Versuchsende rund 66 Umdrehungen ausgeführt.

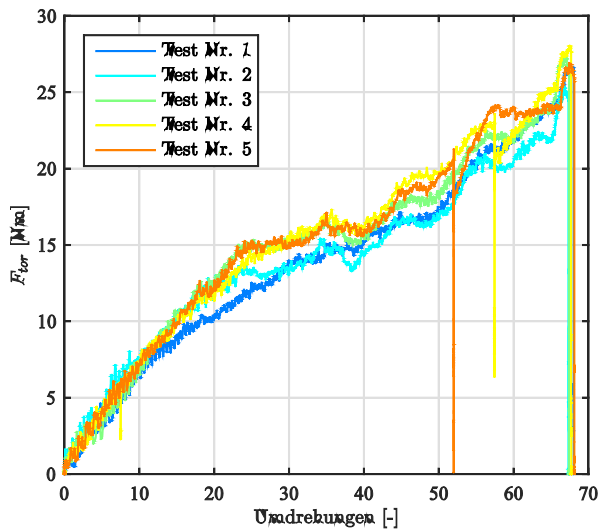


Abbildung 25: Schrauben SFS WT-T 8.2, Vorbohrung $d_{\text{drill}} = 0$, Einschraubrichtung rechtwinklig zur Faser 90° .

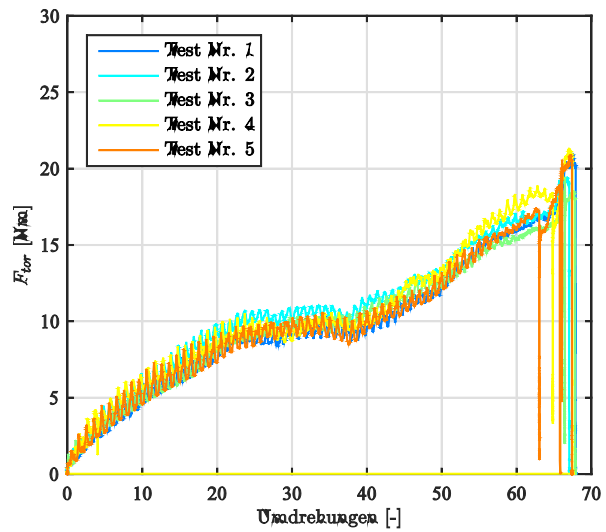


Abbildung 26: Schrauben SFS WT-T 8.2, Vorbohrung $d_{\text{drill}} = 5.0$ mm, Einschraubrichtung rechtwinklig zur Faser 90° .

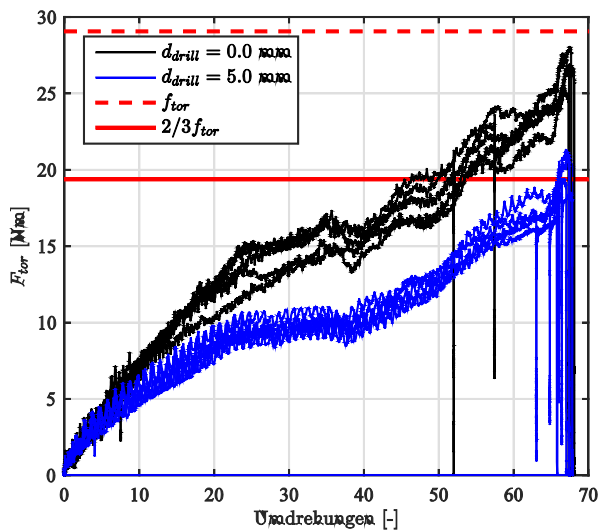


Abbildung 27: Schrauben SFS WT-T 8.2, Einschraubrichtung rechtwinklig zur Faser 90° , Vergleich der Vorbohrung $d_{\text{drill}} = 0$ und $d_{\text{drill}} = 5.0$ mm.

3.1.2.3 Einschraubdrehmoment parallel zur Faser

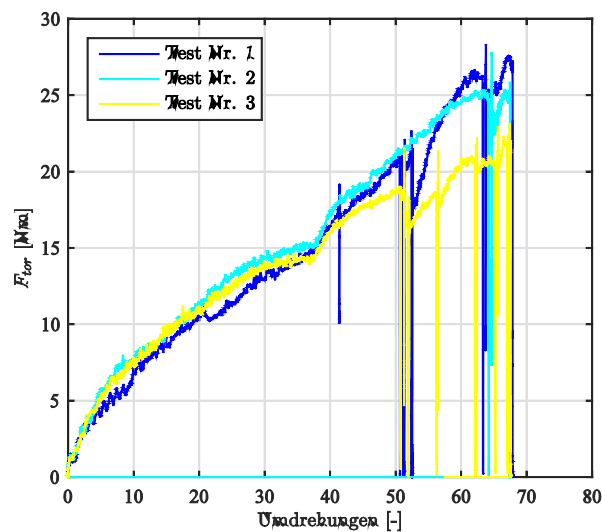


Abbildung 28: Schrauben SFS WT-T 8.2, Vorbohrung $d_{drill} = 0$, Einschraubrichtung parallel zur Faser 0° .

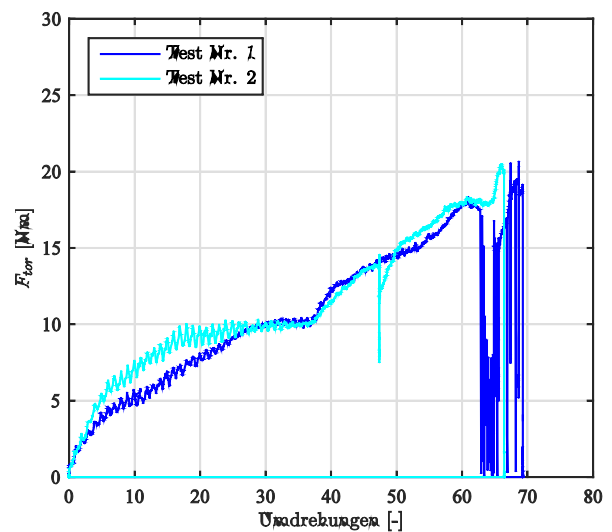


Abbildung 29: Schrauben SFS WT-T 8.2, Vorbohrung $d_{drill} = 5.0$ mm, Einschraubrichtung parallel zur Faser 0° .

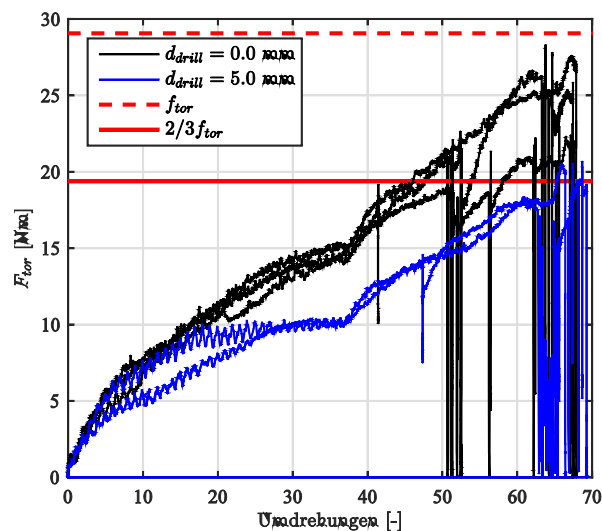


Abbildung 30: Schrauben SFS WT-T 8.2, Einschraubrichtung parallel zur Faser 0° , Vergleich der Vorbohrung $d_{drill} = 0$ und $d_{drill} = 5.0$ mm.

3.1.2.4 Vergleich

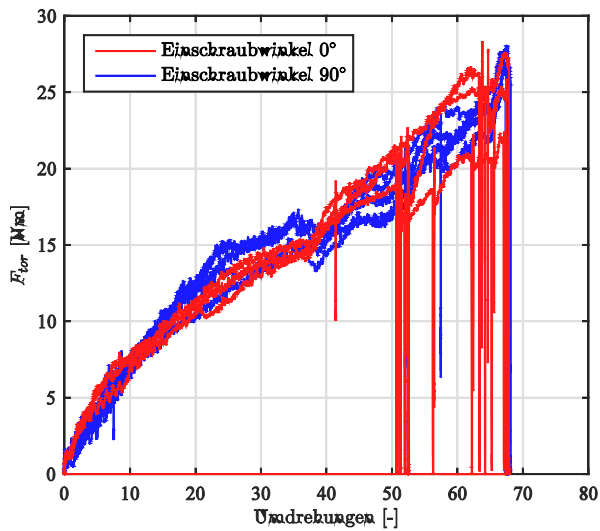


Abbildung 31: Schrauben SFS WT-T 8.2, Vorbohrung $d_{\text{drill}} = 0$, Vergleich der Einschraubrichtung parallel zur Faser 0° und rechtwinklig zur Faser 90° .

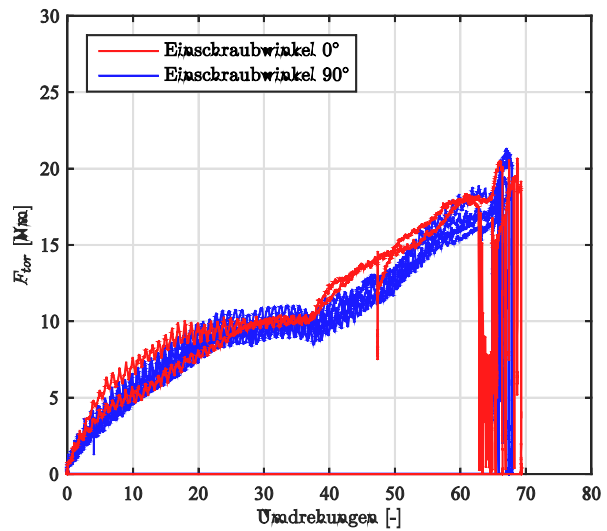


Abbildung 32: Schrauben SFS WT-T 8.2, Vorbohrung $d_{\text{drill}} = 4.0$ mm, Vergleich der Einschraubrichtung parallel zur Faser 0° und rechtwinklig zur Faser 90° .

3.1.3 Schrauben SFS WR-T 13

Tabelle 7: Geometrie und Vorbohrdurchmesser der Schrauben SFS WR-T 13

Schraubentyp	d mm	d_1 mm	d_{drill} mm	d_{drill}/d
SFS WR-T	13	8.5		
			8.5	0.93
			9.0	1.06



Abbildung 33: Schrauben SFS WR-T 13

3.1.3.1 Bruchdrehmoment

Aufgrund des hohen Bruchdrehmomentes konnte dieses bei den schrauben WR-T 13 nicht experimentell bestimmt werden. In Tabelle 8 sind daher nur die Werte aus der ETA angegeben.

Tabelle 8: Bruchdrehmomente der Schrauben SFS WR-T 13

Schraubentyp	f_{tor} N/m	$f_{\text{tor,mean}}$ N/m	$f_{\text{tor,k}}$ N/m
WT-T	ETA-12/0062		111.1

3.1.3.2 Einschraubdrehmoment rechtwinklig zur Faser

Bei den Einschraubversuchen mit den Schrauben WR-T 13 mit Längen von ca. 40 cm konnten nicht die gesamte Schraubenlänge in die BSH-Träger mit einer Höhe von ca. 32 cm eingedreht werden. Ausserdem war der für die grossen Schraubenlängen kein ausreichend langer Bohrer verfügbar, so dass nur ein Teil des Bohrloches vorgebohrt werden konnte.



Abbildung 34: Maximales Eindringen des Bohrers zum Vorbohren der Schraubenlöcher

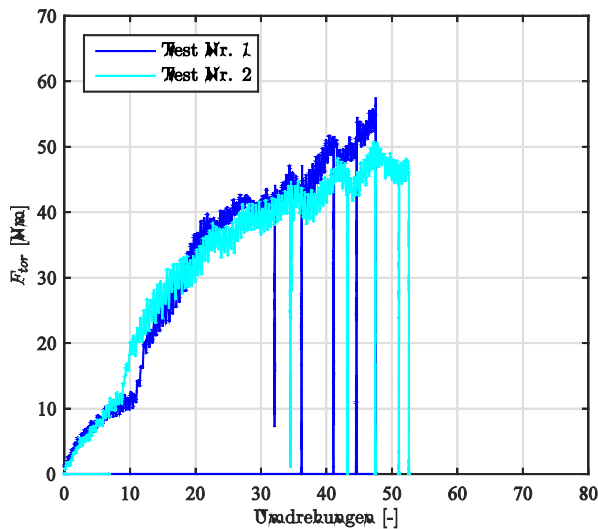


Abbildung 35: Schrauben SFS WR-T 13, Vorbohrung $d_{\text{drill}} = 0$, Einschraubrichtung rechtwinklig zur Faser 90° .

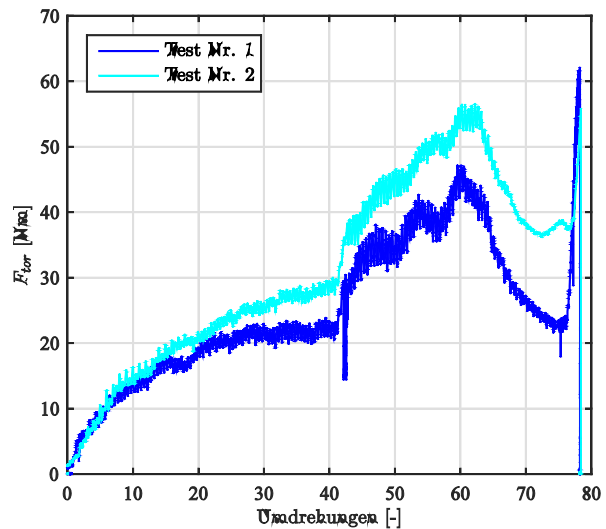


Abbildung 36: Schrauben SFS WR-T 13, Vorbohrung $d_{\text{drill}} = 8.5 \text{ mm}$, Einschraubrichtung rechtwinklig zur Faser 90° .

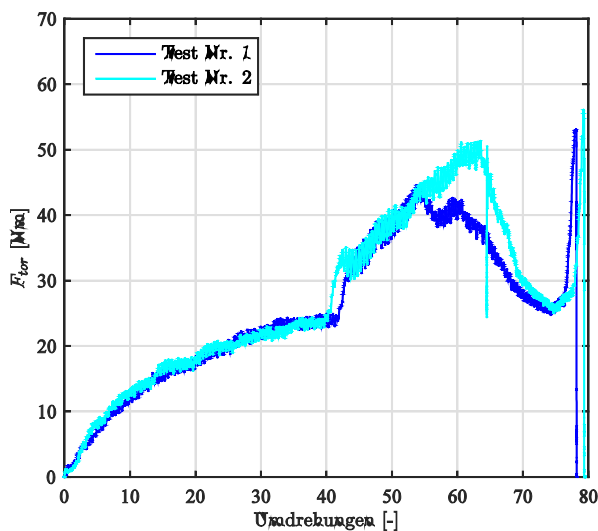


Abbildung 37: Schrauben SFS WR-T 13, Vorbohrung $d_{\text{drill}} = 9.0 \text{ mm}$, Einschraubrichtung rechtwinklig zur Faser 90° .

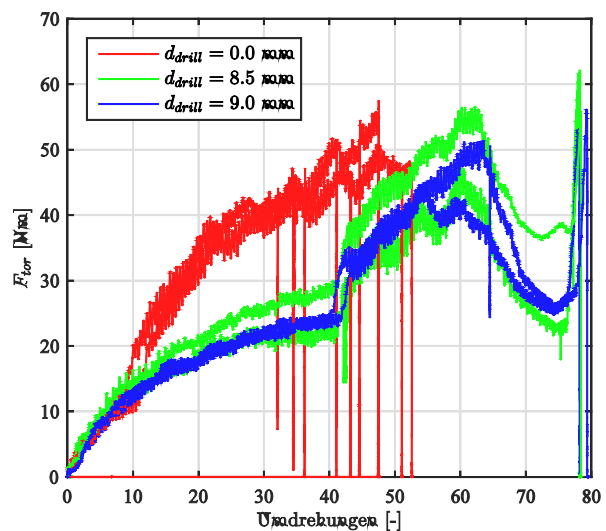


Abbildung 38: Schrauben SFS WR-T 13, Einschraubrichtung rechtwinklig zur Faser 90° , Vergleich der Vorbohrung $d_{\text{drill}} = 0$, $d_{\text{drill}} = 8.5$ und $d_{\text{drill}} = 9.0 \text{ mm}$.

In Abbildung 35 sind die Eindrehmoment der zwei Versuche mit Schrauben WR-T 13 ohne Vorbohrung dargestellt. Während des Einschraubens kam es aufgrund der hohen Drehmomentbelastung des vorhandenen Schraubers zum Abbruch aufgrund des Überlastschutzes. Daher konnten diese Schrauben nicht mehr als ca. 40-50 Umdrehungen, also nur etwa bis zur Hälfte eingedreht werden. Das Drehmoment bei diesen Versuchen stieg sehr schnell stark an und erreichte Maximalwerte von etwa 50-55 Nm.

Bei den Versuchen mit Vorbohrung in Abbildung 36 und Abbildung 37 zeigt sich deutlich der Übergang von vorgebohrten zu nicht vorgebohrten Bereich bei etwa 40 Umdrehungen. Mit weiterem Eindrehen steigt der Eindrehwiderstand auf den Wert wie bei den Schrauben ohne Vorbohrung an. Nach etwa 60 Umdrehungen nimmt das Drehmoment wieder ab, da hier die Schraube auf der anderen Seite des Körpers ausgetreten ist.

3.1.4 Schrauben Powerfast 8mm

Tabelle 9: Geometrie und Vorbohrdurchmesser der Schrauben Powerfast 8 mm

Schraubentyp	d mm	d_1 mm	d_{drill} mm	d_{drill}/d
Powerfast	8	5.4	5.0	0.93
			5.5	1.02
			6.0	1.11



Abbildung 39: Schrauben Powerfast 8 mm

3.1.4.1 Bruchdrehmoment

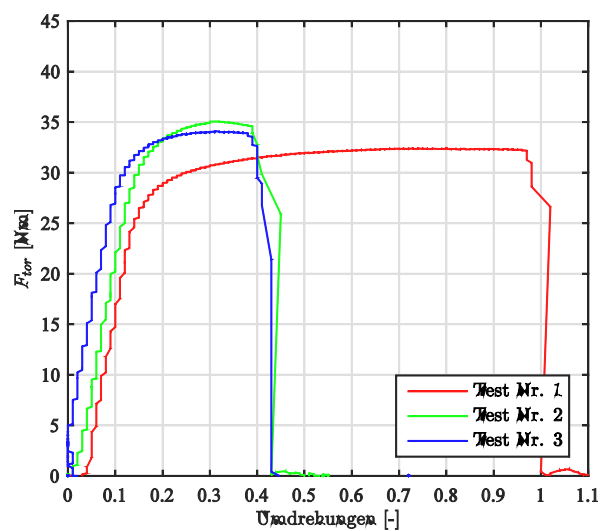


Abbildung 40: Schrauben Powerfast 8 mm, Bruchdrehmoment.

Tabelle 10: Bruchdrehmomente der Schrauben Powerfast 8 mm

Schraubentyp		f_{tor} Nm	$f_{\text{tor,mean}}$ Nm	$f_{\text{tor,k}}$ Nm
Powerfast	Versuch	32.44*		
		35.06		
		34.1		
			34.6	
ETA-11/0331				25.0

*) nicht für die Bestimmung von $f_{\text{tor,mean}}$ verwendet.

3.1.4.2 Einschraubdrehmoment rechtwinklig zur Faser

Die Verläufe und Beträge des Drehmoments für die Vorbohrdurchmesser kleiner oder gleich dem Kerndurchmesser unterscheiden sich kaum voneinander. Das Drehmoment für Vorbohrdurchmesser grösser als dem Kerndurchmesser sind dagegen deutlich tiefer. Bei allen Vorbohrdurchmesser wird beim Auftreffen des Schraubenkopfes auf das Holz der vorgängig geprüfte Wert des Bruchdrehmoments überschritten. Da dieses hohe Drehmoment aber nur lokal am Schraubenkopf vorliegt und von diesem direkt an das Holz übertragen wird, ist in den Versuchen kein Schraubenbruch aufgetreten.

Die Schraube besitzt ein Teilgewinde, welches nach einer gewissen Zeit vollständig in das Holz eingedrungen ist. Da die Gewindehöhe pro Umdrehung ca. 6.0 mm beträgt, geschieht dies nach rund 16 Umdrehungen. In Abbildung 41 bis Abbildung 44 kann man erkennen, dass nach 16 Umdrehungen das Drehmoment bis zum Versenken des Schraubenkopfes nicht mehr deutlich ansteigt und auf einem konstanten Niveau bleibt. Diese Wirkungsweise ist den Schaftfrässrippen am Ende des Gewindeteils zuzuschreiben, die das Bohrloch weiten und die Reibung reduzieren.

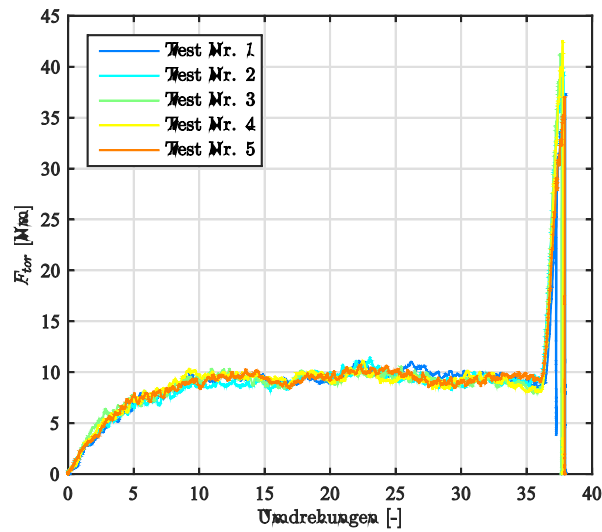


Abbildung 41: Schrauben Powerfast 8 mm, Vorbohrung $d_{\text{drill}} = 5.0$, Einschraubrichtung rechtwinklig zur Faser 90° .

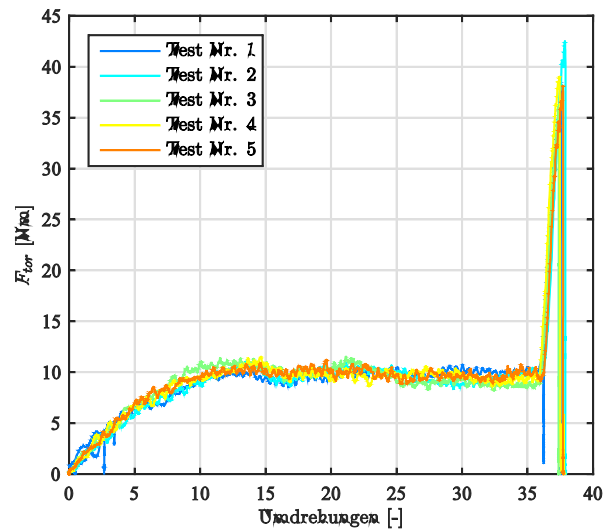


Abbildung 42: Schrauben Powerfast 8 mm, Vorbohrung $d_{\text{drill}} = 5.5$ mm, Einschraubrichtung rechtwinklig zur Faser 90° .

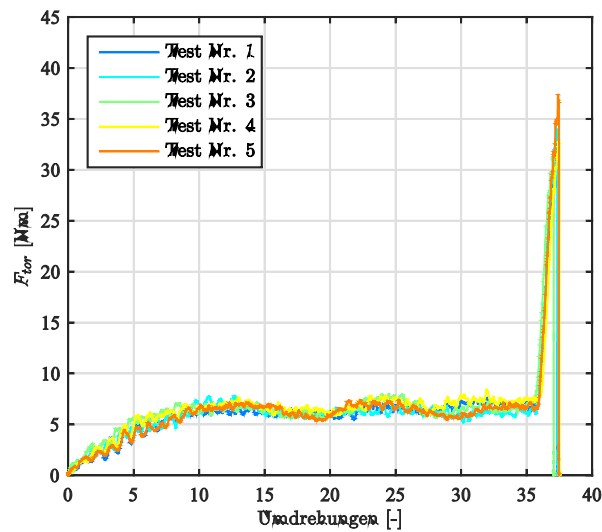


Abbildung 43: Schrauben Powerfast 8 mm, Vorbohrung $d_{\text{drill}} = 6.0$ mm, Einschraubrichtung rechtwinklig zur Faser 90° .

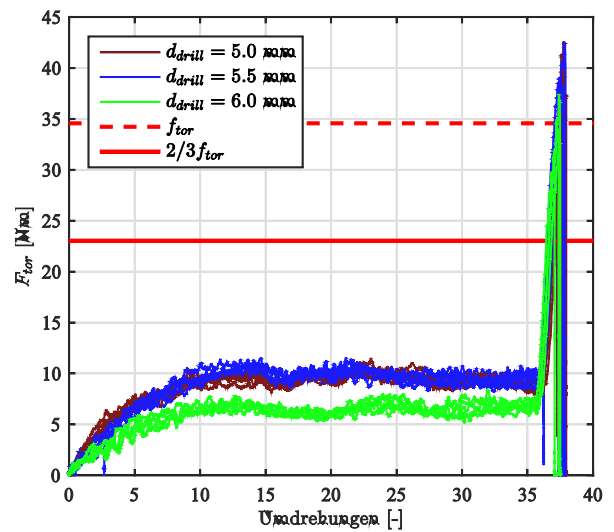


Abbildung 44: Schrauben Powerfast 8 mm, Einschraubrichtung rechtwinklig zur Faser 90° , Vergleich der Vorbohrung $d_{\text{drill}} = 5.0$ mm, $d_{\text{drill}} = 5.5$ mm und $d_{\text{drill}} = 6.0$ mm.

3.1.5 Schrauben Sherpa 8 mm

Tabelle 11: Geometrie und Vorbohrdurchmesser der Schrauben Sherpa 8 mm

Schraubentyp	d mm	d_1 mm	d_{drill} mm	d_{drill}/d
Sherpa	8	5.3	5.0	0.94
			5.5	1.04

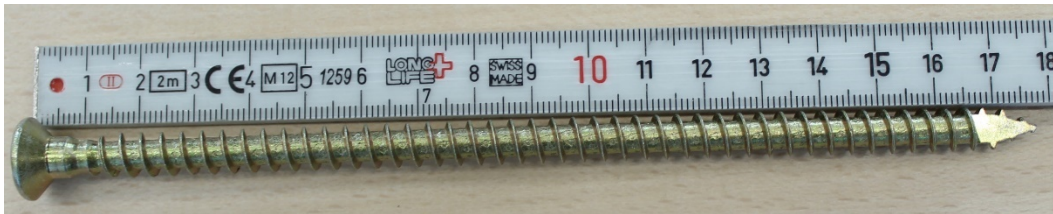


Abbildung 45: Schrauben Sherpa 8 mm

3.1.5.1 Bruchdrehmoment

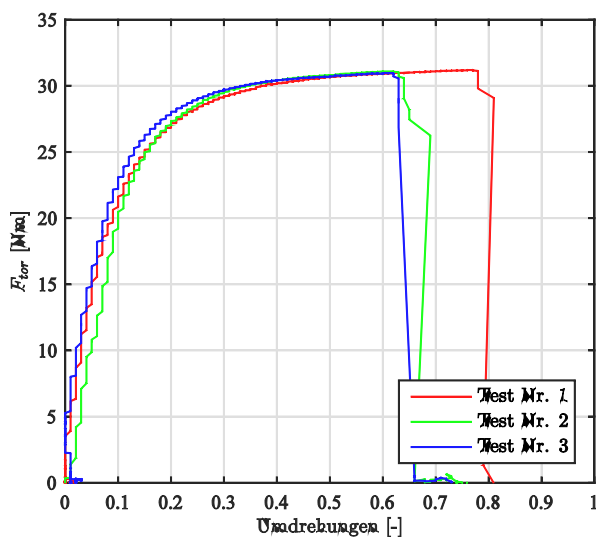


Abbildung 46: Schrauben Sherpa 8 mm, Bruchdrehmoment.

Tabelle 12: Bruchdrehmomente der Schrauben Sherpa 8 mm

Schraubentyp		f_{tor} Nm	$f_{\text{tor,mean}}$ Nm	$f_{\text{tor,k}}$ Nm
Sherpa	Versuch	31.19		
		31.09		
		30.96		
			31.1	

In ETA 12-0067 sind keine Werte des Bruchdrehmoments angegeben.

3.1.5.2 Einschraubdrehmoment rechtwinklig zur Faser

In den Versuchen an Sherpa Schrauben wurden verschiedene Vorbohrdurchmesser untersucht. Bei nicht vorgebohrten Schrauben liegt das Eindrehmoment deutlich über dem der vorgebohrten Schrauben. Es zeigt sich jedoch, dass erst bei grossen Einschraubtlängen eine Überschreitung des Grenzwertes von $2/3$ des Bruchdrehmoments. Zwischen den Eindrehmomenten bei Vorbohrdurchmessern $d_{\text{drill}}/d \approx 0.95$ und 1.05 besteht kaum ein Unterschied. Nach einem Anstieg zu Beginn der Verläufe der Eindrehmomente, flachen sie ab, steigen aber weiter stetig an. Obwohl das Bruchdrehmoment der Schrauben beim Auftreten des Schraubenkopfes überschritten wurde, sind keine der Schrauben bei Einbringen versagt. Unterschiede der maximalen Anzahl an Umdrehungen stammen aus leicht unterschiedlichen Versenkungstiefen der Schraubenköpfe.

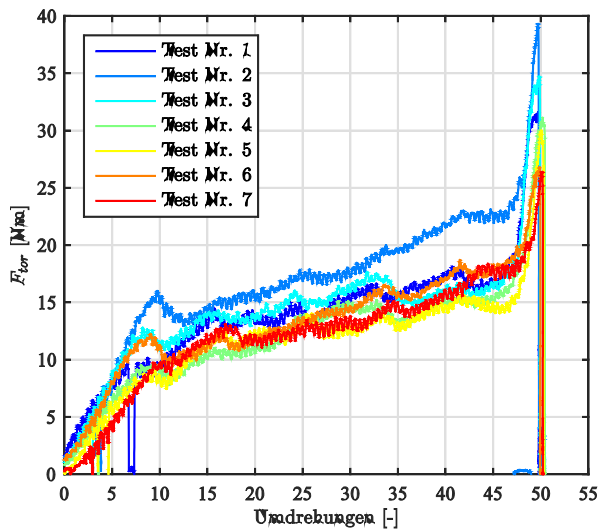


Abbildung 47: Schrauben Sherpa 8 mm, Vorbohrung $d_{\text{drill}} = 0$, Einschraubrichtung rechtwinklig zur Faser 90° .

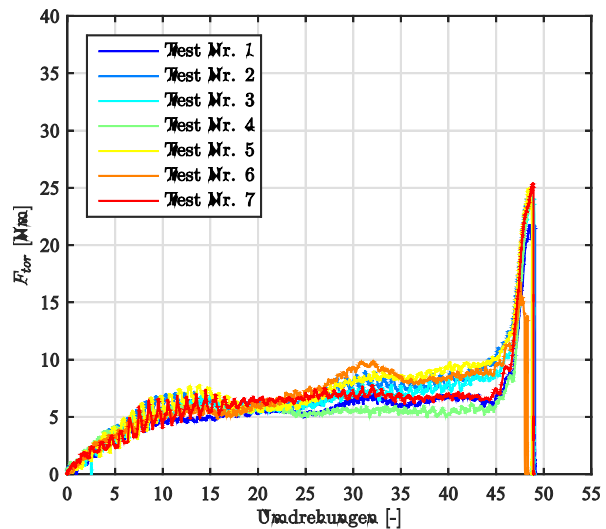


Abbildung 48: Schrauben Sherpa 8 mm, Vorbohrung $d_{\text{drill}} = 5.0$ mm, Einschraubrichtung rechtwinklig zur Faser 90° .

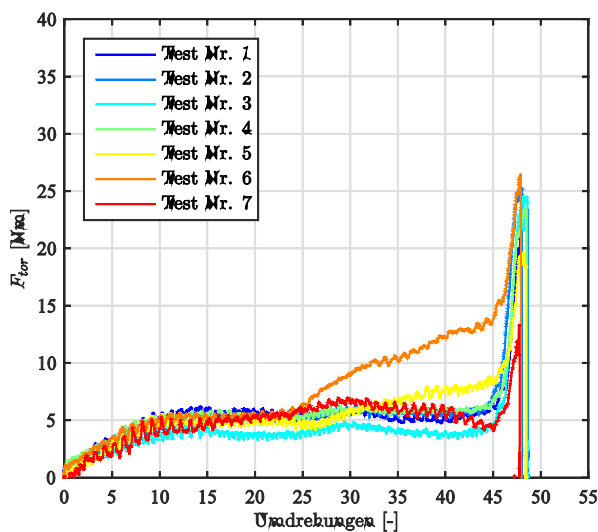


Abbildung 49: Schrauben Sherpa 8 mm, Vorbohrung $d_{\text{drill}} = 5.5$ mm, Einschraubrichtung rechtwinklig zur Faser 90° .

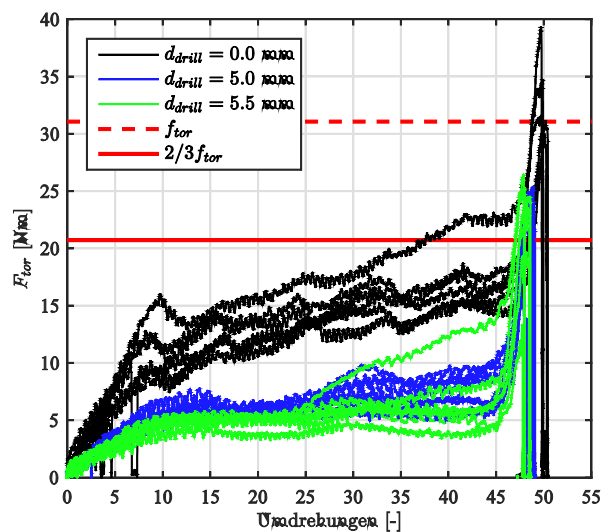


Abbildung 50: Schrauben Sherpa 8 mm, Einschraubrichtung rechtwinklig zur Faser 90° , Vergleich der Vorbohrung $d_{\text{drill}} = 0$, $d_{\text{drill}} = 5.0$ mm und $d_{\text{drill}} = 5.5$ mm.

3.1.5.3 Einschraubdrehmoment parallel zur Faser

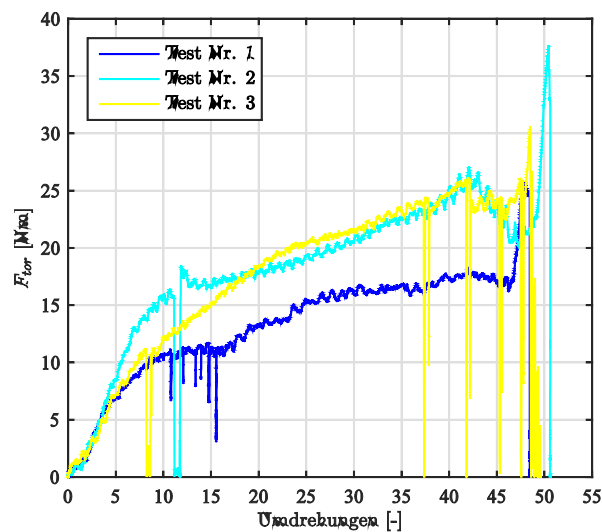


Abbildung 51: Schrauben Sherpa 8 mm, Vorbohrung $d_{\text{drill}} = 0$, Einschraubrichtung parallel zur Faser 0° .

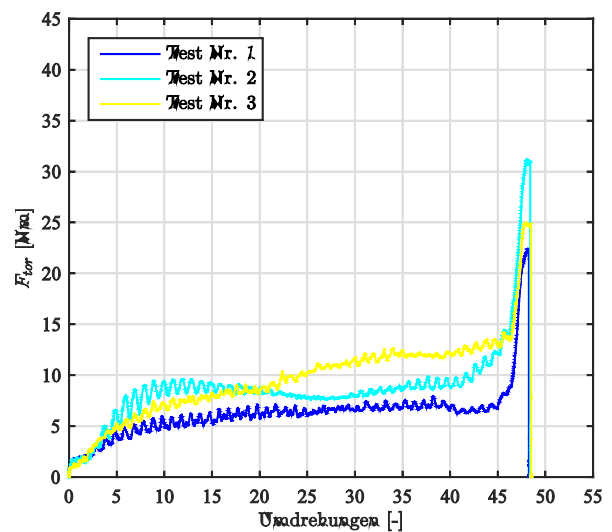


Abbildung 52: Schrauben Sherpa 8 mm, Vorbohrung $d_{\text{drill}} = 5.0$ mm, Einschraubrichtung parallel zur Faser 0° .

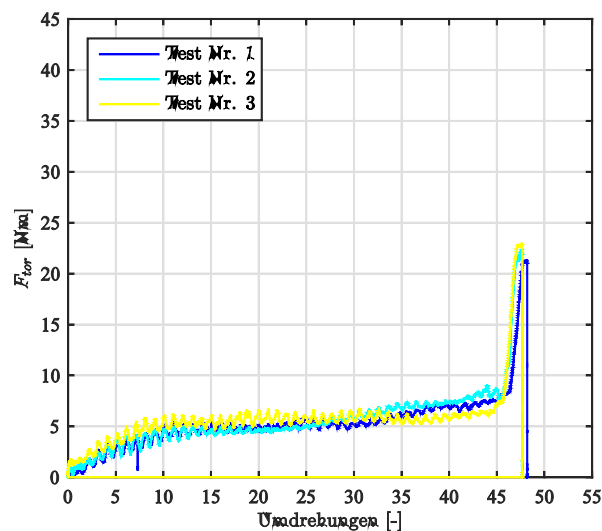


Abbildung 53: Schrauben Sherpa 8 mm, Vorbohrung $d_{\text{drill}} = 5.5$ mm, Einschraubrichtung parallel zur Faser 0° .

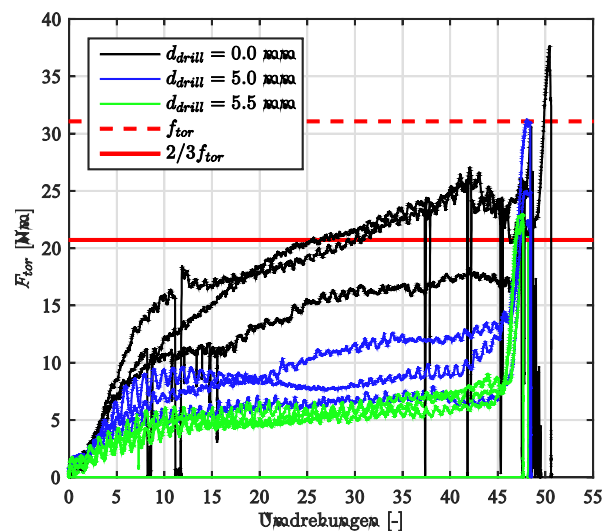


Abbildung 54: Schrauben Sherpa 8 mm, Einschraubrichtung parallel zur Faser 0° , Vergleich der Vorbohrung $d_{\text{drill}} = 0$ und $d_{\text{drill}} = 5.0$ mm.

3.1.5.4 Vergleich

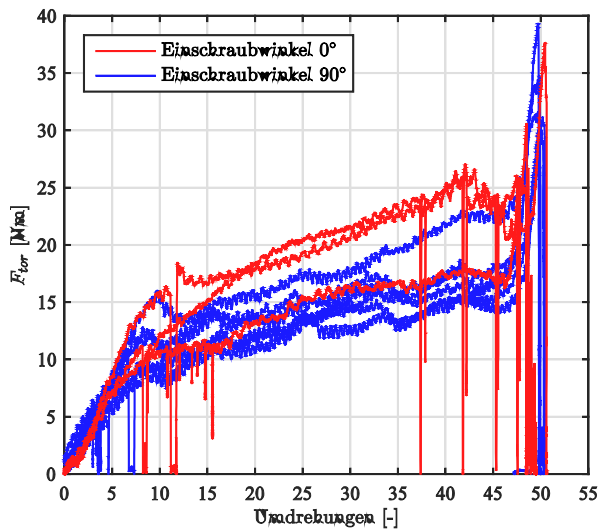


Abbildung 55: Schrauben Sherpa 8 mm, Vorbohrung $d_{drill} = 0$, Vergleich der Einschraubrichtung parallel zur Faser 0° und rechtwinklig zur Faser 90° .

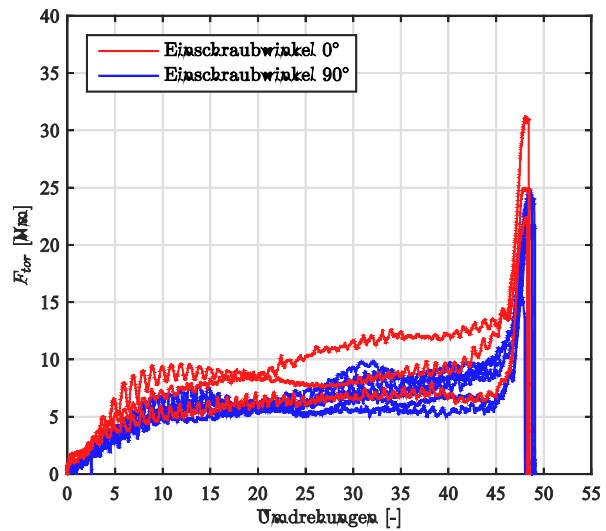


Abbildung 56: Schrauben Sherpa 8 mm, Vorbohrung $d_{drill} = 5.0$ mm, Vergleich der Einschraubrichtung parallel zur Faser 0° und rechtwinklig zur Faser 90° .

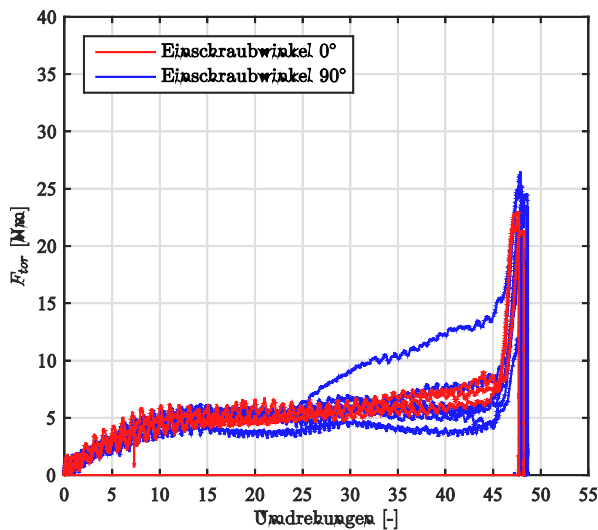


Abbildung 57: Schrauben Sherpa 8 mm, Vorbohrung $d_{drill} = 5.5$ mm, Vergleich der Einschraubrichtung parallel zur Faser 0° und rechtwinklig zur Faser 90° .

3.1.6 Schrauben Würth 6 mm

Tabelle 13: Geometrie und Vorbohrdurchmesser der Schrauben Würth Assy 6 mm

Schraubentyp	d mm	d_1 mm	d_{drill} mm	d_{drill}/d
Würth	6	3.8	4.0	1.05



Abbildung 58: Schrauben Würth Assy 6 mm

3.1.6.1 Bruchdrehmoment

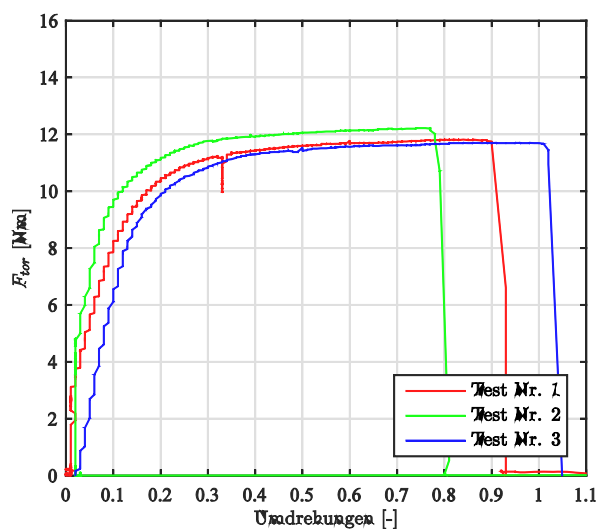


Abbildung 59: Schrauben Würth Assy 6 mm, Bruchdrehmoment.

Tabelle 14: Bruchdrehmomente der Schrauben Würth Assy 6 mm

Schraubentyp		f_{tor} Nm	$f_{\text{tor,mean}}$ Nm	$f_{\text{tor,k}}$ Nm
Würth	Versuch	11.82		
		12.22		
		11.70		
			11.9	
ETA-11/0190				10.0

3.1.6.2 Einschraubdrehmoment rechtwinklig zur Faser

Der Unterschied der Eindrehmomente mit und ohne Vorbohrung ist beträchtlich. Die Variation des Drehmoments in Abhängigkeit der einzelnen Lamellen ist deutlich zu erkennen. Bei den Schrauben ohne Vorbohrung ist ein sehr starker Anstieg des Drehmoments zu Beginn des Einschraubens zu erkennen. Trotz des Vollgewindes steigt das Drehmoment mit grösserer Einschraublänge nur gering an. Das Bruchdrehmoment der Schraube wurde von den nicht vorgebohrten Versuchen beim Auftreffen des Schraubenkopfes auf das Holz mehrere Male überschritten, wobei bei einer der Schrauben der Kopf beim Versenken abbrach. Die Einschraubgeschwindigkeit betrug jeweils etwa 100 Umdrehungen pro Minute

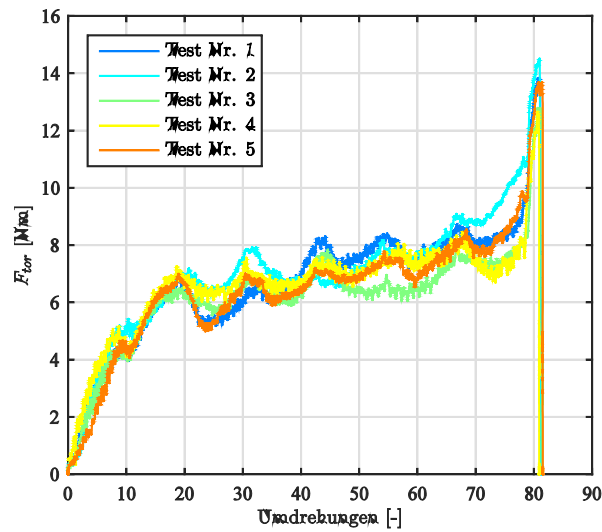


Abbildung 60: Schrauben Würth Assy 6 mm, Vorbohrung $d_{\text{drill}} = 0$, Einschraubrichtung rechtwinklig zur Faser 90° .

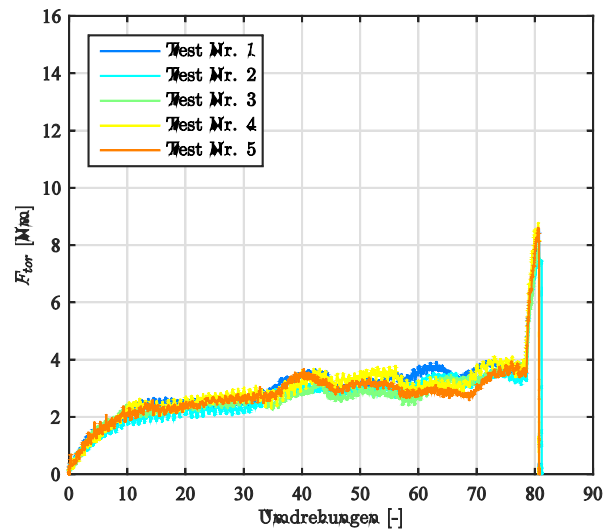


Abbildung 61: Schrauben Würth Assy 6 mm, Vorbohrung $d_{\text{drill}} = 4.0$ mm, Einschraubrichtung rechtwinklig zur Faser 90° .

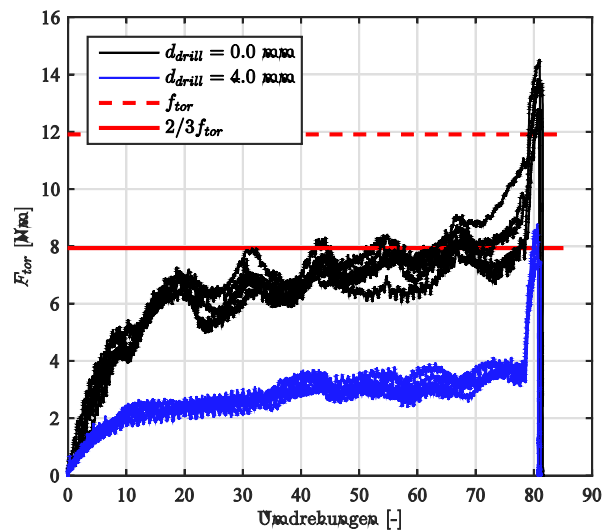


Abbildung 62: Schrauben Würth Assy 6 mm, Einschraubrichtung rechtwinklig zur Faser 90° , Vergleich der Vorbohrung $d_{\text{drill}} = 0$ und $d_{\text{drill}} = 4.0$ mm.

3.1.6.3 Einschraubdrehmoment parallel zur Faser

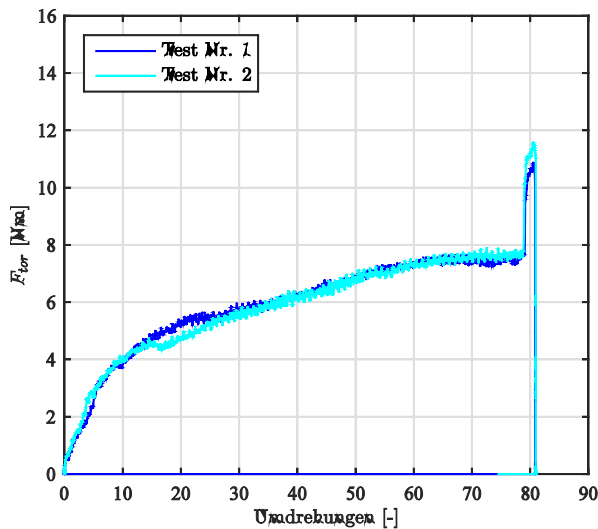


Abbildung 63: Schrauben Würth Assy 6 mm, Vorbohrung $d_{\text{drill}} = 0$, Einschraubrichtung parallel zur Faser 0° .

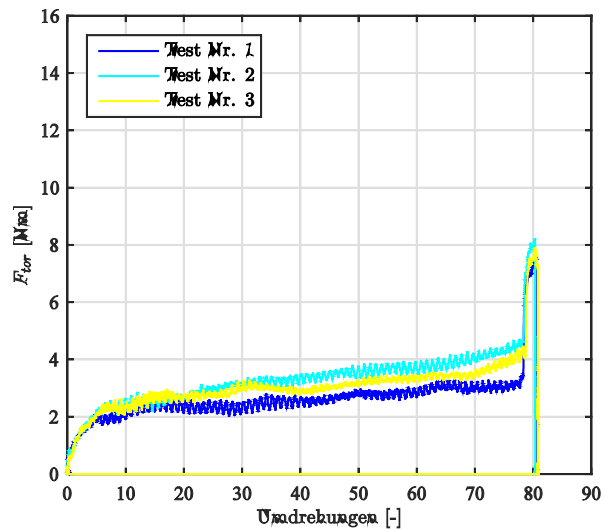


Abbildung 64: Schrauben Würth Assy 6 mm, Vorbohrung $d_{\text{drill}} = 4.0$ mm, Einschraubrichtung parallel zur Faser 0° .

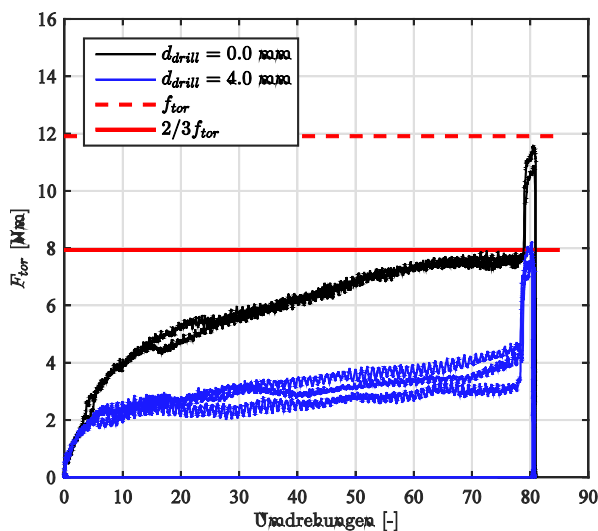


Abbildung 65: Schrauben Würth Assy 6 mm, Einschraubrichtung parallel zur Faser 0° , Vergleich der Vorbohrung $d_{\text{drill}} = 0$ und $d_{\text{drill}} = 4.0$ mm.

3.1.6.4 Vergleich

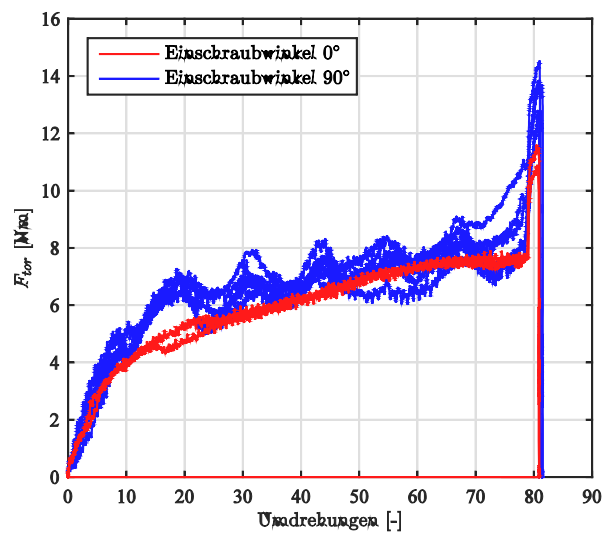


Abbildung 66: Schrauben Würth Assy 6 mm, Vorbohrung $d_{drill} = 0$, Vergleich der Einschraubrichtung parallel zur Faser 0° und rechtwinklig zur Faser 90°.

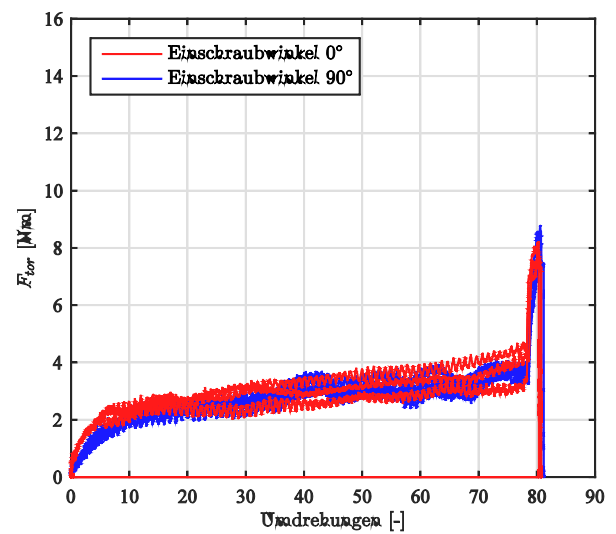


Abbildung 67: Schrauben Würth Assy 6 mm, Vorbohrung $d_{drill} = 4.0$ mm, Vergleich der Einschraubrichtung parallel zur Faser 0° und rechtwinklig zur Faser 90°.

3.1.7 Schrauben Würth 10 mm

Tabelle 15: Geometrie und Vorbohrdurchmesser der Schrauben Würth Assy 10 mm

Schraubentyp	d mm	d_1 mm	d_{drill} mm	d_{drill}/d
Würth	10	6.2	6.0	0.97
			6.5	1.05
			7.0	1.13

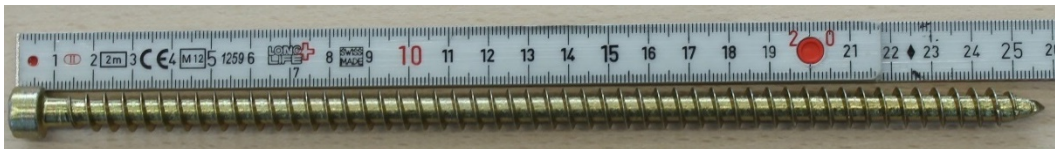


Abbildung 68: Schrauben Würth Assy 10 mm

3.1.7.1 Bruchdrehmoment

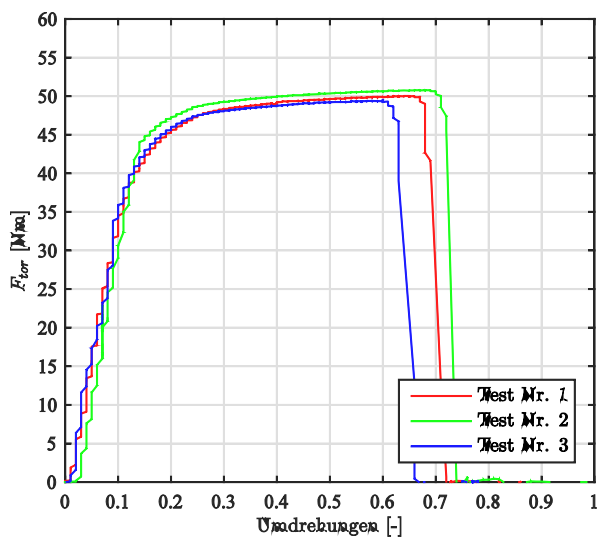


Abbildung 69: Schrauben Würth Assy 10 mm, Bruchdrehmoment.

Tabelle 16: Bruchdrehmomente der Schrauben Würth Assy 10 mm

Schraubentyp		f_{tor} Nm	$f_{\text{tor,mean}}$ Nm	$f_{\text{tor,k}}$ Nm
Würth	Versuch	50.03		
		50.79		
		49.49		
			50.1	
ETA-11/0190				45.0

3.1.7.2 Einschraubdrehmoment rechtwinklig zur Faser

In Abbildung 74 zeigt sich wiederum ein deutlicher Unterschied der Eindrehmomente mit und ohne Vorbohrung. Die Variation des Drehmoments in Abhängigkeit der einzelnen Lamellen ist für die nicht-vorgebohrten Schrauben deutlich zu erkennen. Bei den Schrauben ohne Vorbohrung ist ein sehr starker Anstieg des Drehmoments zu Beginn des Einschraubens zu erkennen. Trotz des Vollgewindes steigt das Drehmoment mit grösserer Einschraublänge nur gering an. Das Bruchdrehmoment der Schraube wurde von den nicht vorgebohrten Versuchen beim Auftreffen des Schraubenkopfes auf das Holz überschritten.

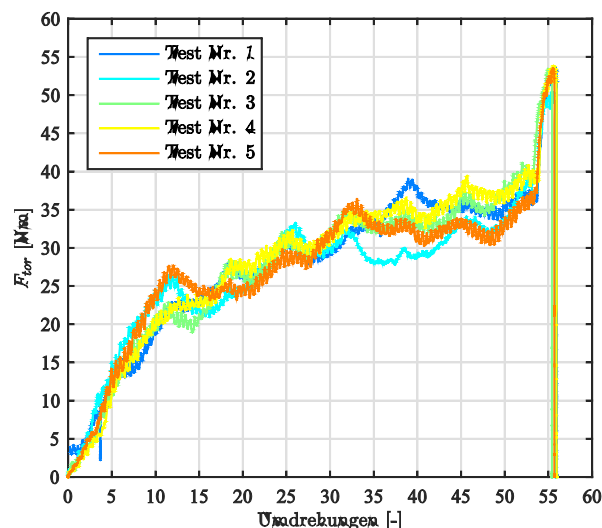


Abbildung 70: Schrauben Würth Assy 10 mm, Vorbohrung $d_{\text{drill}} = 0$, Einschraubrichtung rechtwinklig zur Faser 90° .

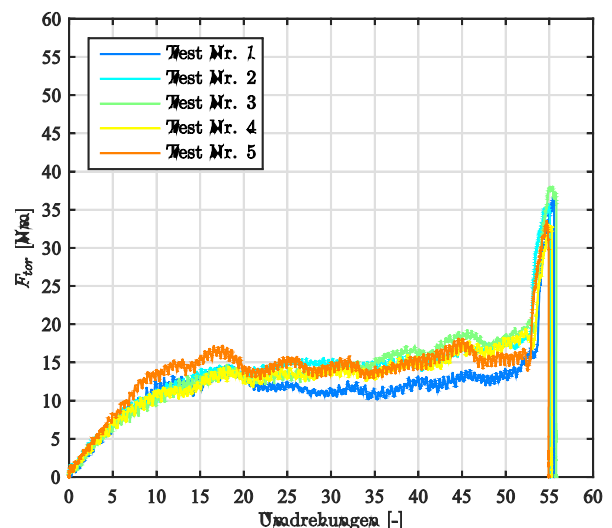


Abbildung 71: Schrauben Würth Assy 10 mm, Vorbohrung $d_{\text{drill}} = 6.0$ mm, Einschraubrichtung rechtwinklig zur Faser 90° .

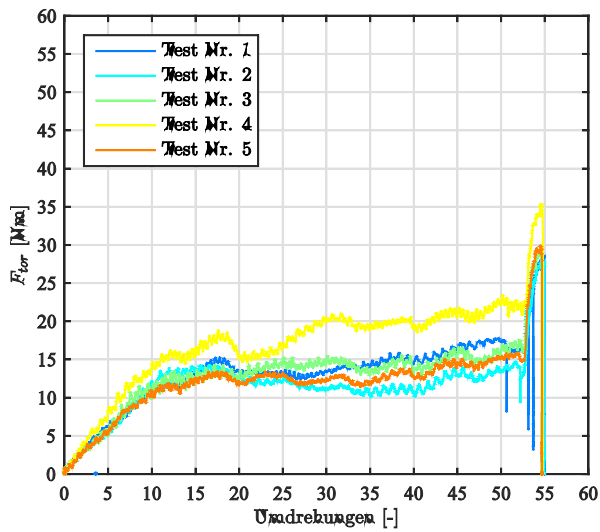


Abbildung 72: Schrauben Würth Assy 10 mm, Vorbohrung $d_{drill} = 6.5$, Einschraubrichtung rechtwinklig zur Faser 90° .

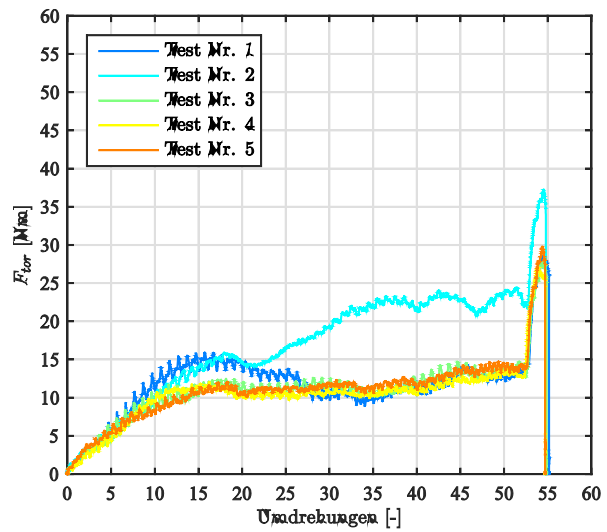


Abbildung 73: Schrauben Würth Assy 10 mm, Vorbohrung $d_{drill} = 7.0$, Einschraubrichtung rechtwinklig zur Faser 90° .

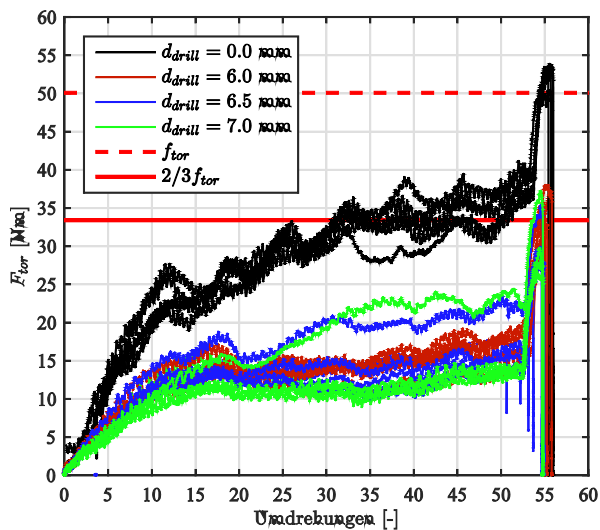


Abbildung 74: Schrauben Würth Assy 10 mm, Einschraubrichtung rechtwinklig zur Faser 90° , Vergleich der Vorbohrung $d_{drill} = 0$ und $d_{drill} = 4.0$ mm.

3.1.7.3 Einschraubdrehmoment parallel zur Faser

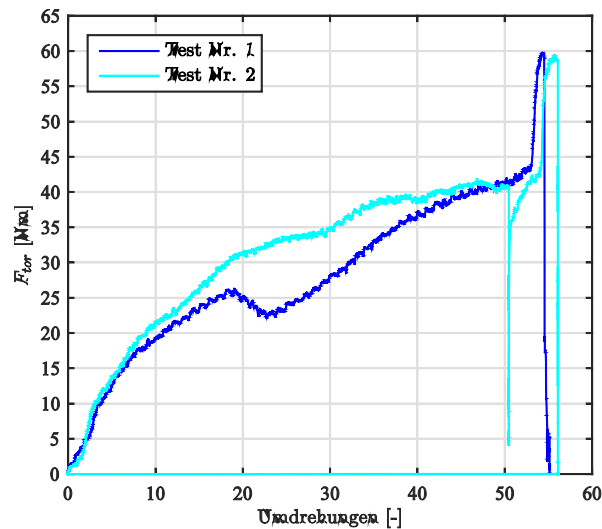


Abbildung 75: Schrauben Würth Assy 10 mm, Vorbohrung $d_{\text{drill}} = 0$, Einschraubrichtung parallel zur Faser 0° .

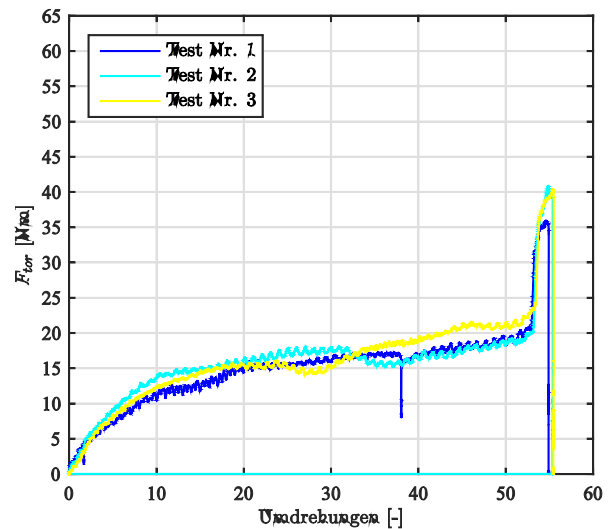


Abbildung 76: Schrauben Würth Assy 10 mm, Vorbohrung $d_{\text{drill}} = 6.0$ mm, Einschraubrichtung parallel zur Faser 0° .

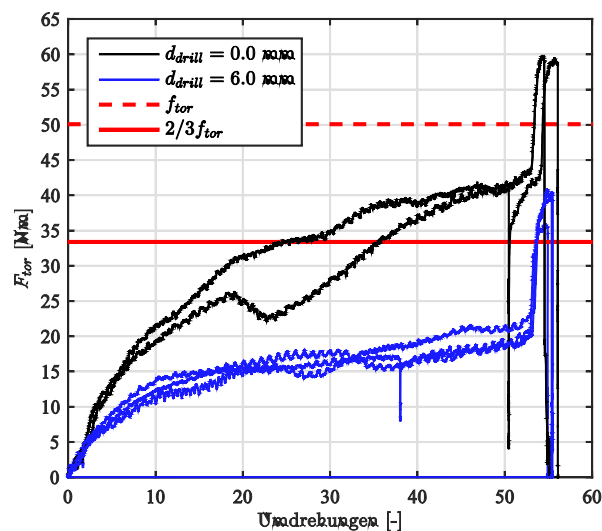


Abbildung 77: Schrauben Würth Assy 10 mm, Einschraubrichtung parallel zur Faser 0° , Vergleich der Vorbohrung $d_{\text{drill}} = 0$ und $d_{\text{drill}} = 6.0$ mm.

3.1.7.4 Vergleich

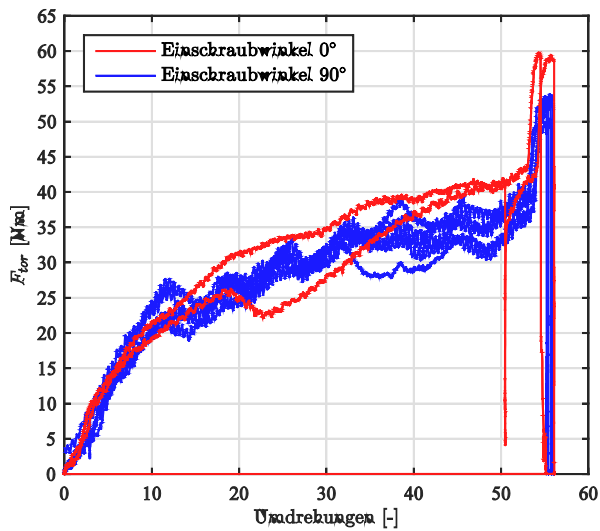


Abbildung 78: Schrauben Würth Assy 10 mm, Vorbohrung $d_{drill} = 0$, Vergleich der Einschraubrichtung parallel zur Faser 0° und rechtwinklig zur Faser 90° .

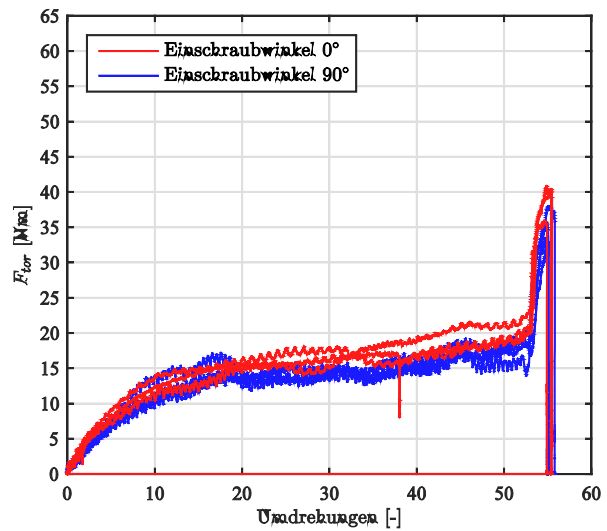


Abbildung 79: Schrauben Würth Assy 10 mm, Vorbohrung $d_{drill} = 6.0$ mm, Vergleich der Einschraubrichtung parallel zur Faser 0° und rechtwinklig zur Faser 90° .

3.1.8 Diskussion

3.1.8.1 Maximale Einschraubtiefe ohne Vorbohren

Aus der Bedingung des maximalen Drehmoments von $2/3$ des Bruchdrehmoments ergeben sich die folgenden maximalen Einschraubtiefen der Schrauben ohne Vorbohren in Tabelle 17. Die maximalen Einschraubtiefen wurden mit dem gemessenen Bruchdrehmoment der Schrauben bestimmt, das zum Teil deutlich höher als das in der ETA angegebene Bruchdrehmoment ist. Insbesondere beim Einschrauben parallel zur Faser hängt das Drehmoment sehr stark von der Rohdichte der jeweiligen Lamelle ab (z.B. im Fall der Sherpa Schrauben).

Tabelle 17: Mittlere maximalen Einschraubtiefen der Schrauben ohne Vorbohren

	SFS WT-T $d = 6,5 \text{ mm}$	SFS WT-T $d = 8,2 \text{ mm}$	Sherpa $d = 8 \text{ mm}$	Würth $d = 6 \text{ mm}$	Würth $d = 10 \text{ mm}$
Senkrecht	$25 \cdot d$	$18 \cdot d$	$22 \cdot d$	$21 \cdot d$	$17 \cdot d$
Parallel	$24 \cdot d$	$18 \cdot d$	$16 \cdot d$	$33 \cdot d$	$13 \cdot d$

3.1.8.2 Einfluss des Vorbohrdurchmessers

Der Durchmesser der vorgebohrten Löcher wurde zwischen $d_{\text{Drill}} = 0$ (kein Vorbohren) und $d_{\text{Drill}} \approx 0,9 d_{\text{core}}$ bis $d_{\text{Drill}} \approx 1,15 d_{\text{core}}$ variiert. Bei den Fällen ohne und mit Vorbohren ist ein erheblicher Unterschied im Torsionsmoment zu erkennen. Wenn die Schrauben nicht vorbohrt werden, wird die Grenze von $2/3$ der Torsionsfestigkeit der Schrauben bei größerer Einschraublänge überschritten. Beim Vorbohren liegt das Drehmoment meist weit unter dieser Grenze, unabhängig vom Vorbohrdurchmesser. Daraus lässt sich schließen, dass ein Vorbohren mit einem Durchmesser im Bereich des Kerndurchmessers erforderlich ist. Es kann der gleich Vorbohrdurchmesser wie bei Nadelholz gewählt werden (abgerundet d_{core}).

3.1.8.3 Einfluss des Schraubenkopfes

Sobald der Schraubenkopf die Holzoberfläche erreicht, steigt das Torsionsmoment deutlich an und überschreitet die Grenze der Torsionsfestigkeit bei der Schraube. Daher ist besonders auf das sorgfältige Anziehen der Schrauben zu achten, um die Schrauben nicht zu überdrehen. Bei Schrauben mit kleinem zylindrischen Schraubenkopf ist der Anstieg des Drehmoments geringer und solche Schrauben sollten für den Einsatz in Hartholz bevorzugt werden.

3.1.9 Einfluss der Schraubenachsen-Faser-Richtung.

Es wurden keine größeren Unterschiede bei verschiedenen Schrauben in Richtung parallel oder rechtwinklig zur Faserrichtung beobachtet. Der einzige klare Unterschied besteht darin, dass beim Einschrauben rechtwinklig zur Faserrichtung kleinere Peaks und Variationen des Einschraubdrehmoments auftreten, wie wenn die Schraubenspitze durch verschiedene Lamellen und evtl. Frühholz/Spätholz laufen. Dabei kommt es zu einer Homogenisierung des Einschraubdrehmomentes und die verschiedenen Lamellen gleichen sich gegenseitig aus. Beim Einschrauben parallel zur Faser treten nur sehr geringe Variationen des Drehmoments auf, da sich die Schrauben stets in einer einzigen Lamelle befindet, jedoch gibt es deutliche Unterschiede im Drehmoment zwischen den verschiedenen Lamellen. Die im Projekt untersuchten Rohdichten betrugen im Mittel etwa 720 kg/m^3 .

3.1.10 Einfluss der Schraubenform

Bei Vollgewindeschrauben steigt nach einem ersten starken Anstieg das Drehmoment im weiteren Verlauf langsam an.

Bei den Teilwindeschrauben Powerfast ist mit grösseren Einschraublänge kaum ein Anstieg des Drehmoments zu erkennen. Bei Doppelgewindeschrauben WT-T zeigt sich bei Eintritt des zweiten Gewindeteils ein zweiter deutlicher Anstieg des Drehmoments. Dieser Anstieg führt zu einer deutlichen Überschreitung des Limits von $\frac{2}{3}$ des Bruchdrehmoments selbst bei Vorbohrung. Eine Optimierung der Schrauben scheint daher notwendig.

3.2 Ausziehprüfungen

3.2.1 Allgemein

3.2.1.1 Hintergrund

Die von Hübner gemachten Untersuchungen zur Auszugsfestigkeit von Schrauben in Laubholz werden im Folgenden evaluiert. Die Versuche von Hübner wurden an vorgebohrten Schrauben in verschiedene BSH aus Esche und Robinien sowie in Massivholz aus Buche gemacht, die gegen Aufspalten verstärkt waren. Die Dichte hatte eine grosse Bandbreite von 575-915 kg/m³ und betrug im Mittel 752 kg/m³ mit einer Holzfeuchte von 12 %. Für die Berücksichtigung des Einflusses des Winkels zwischen Schraubenachse und Faserrichtung wurde von Hübner ein bilineares Modell verwendet.

Die folgende Gleichung für die Auszugsfestigkeit auf mittlerem Niveau wird von Hübner für Schrauben in Eschen, Robinien und Buchenholz vorgeschlagen:

$$R_{ax,mean} = 2.59 \cdot 10^{-3} l_{ef}^{0.965} \rho_{12}^{1.61} d^{0.675} \begin{cases} 1 - 5,72 \cdot 10^{-3} (30^\circ - \alpha) & \text{für } 0^\circ \leq \alpha < 30^\circ \\ 1 & \text{für } 30^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ \end{cases}$$

Zum Vergleich mit bestehenden Untersuchungen zog Hübner das Hankinson-Modell heran.

$$R_{ax,mean} = \frac{2.59 \cdot 10^{-3} l_{ef}^{0.965} \rho_{12}^{1.61} d^{0.675}}{\sin^2 \alpha + 1.20 \cos^2 \alpha}$$

Ziel dieser Studie ist es, die von Hübner vorgeschlagenen Gleichungen für die Buche GLT zu validieren und die Auswirkungen weiterer Parameter zu untersuchen. Um die Auswirkungen der folgenden Parameter zu ermitteln, wurden Ausziehprüfungen durchgeführt:

- Größere Durchmesser von Schrauben und Gewindestangen
- Winkel zwischen Schraubenachse und Faserrichtung
- Effektive Gewindelänge
- Durchmessers der vorgebohrten Löcher

3.2.1.2 Auswertung der Prüfungen

Die Ausziehprüfungen wurden weggesteuert mit einer Belastungsdauer von ca. 300s bis zur Versagen durchgeführt. Die Ausziehverformung wurde am belasteten Ende der Schraube gemessen. Die Auszugsfestigkeit wurde aus der maximalen Belastung wie folgt berechnet.

$$f_{ax} = \frac{F_{\max}}{\pi \cdot d \cdot l_{ef}}$$

Im Gegensatz zu dieser Definition ist der Ausziehparameter $F_{ax} = F_{\max}/(d \cdot l_{ef})$ nach EN 1382 um den Faktor π höher.

3.2.2 Ergebnisse

3.2.2.1 Einfluss des Schraubendurchmessers

Die Auszugsfestigkeit nimmt mit zunehmendem Durchmesser der Schraube ab, wie in Abbildung 80 dargestellt. Für den Vergleich mit dem Vorschlag von Hübner (bi-linearer Ansatz) wurde eine effektive Gewindelänge $l_{ef} = 10d$ und eine mittlere Rohdichte $\rho = 700 \text{ kg/m}^3$ verwendet. Diese Dichte ist geringer als die mittlere Dichte der Prüfwerte, zunächst soll jedoch nur der generelle Einfluss des Durchmessers verglichen werden. In EC5 wird der Effekt des Schraubendurchmessers durch einen Exponenten von -0,5 berücksichtigt.

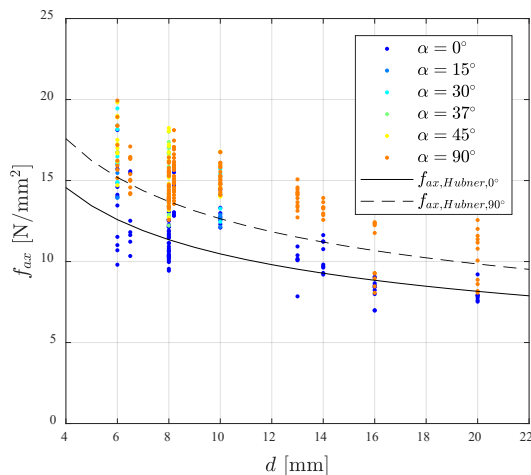


Abbildung 80: Einflusses des Schraubendurchmessers auf die Auszugsfestigkeit; alle Ergebnisse sowie Unterteilung nach Einschraubwinkel

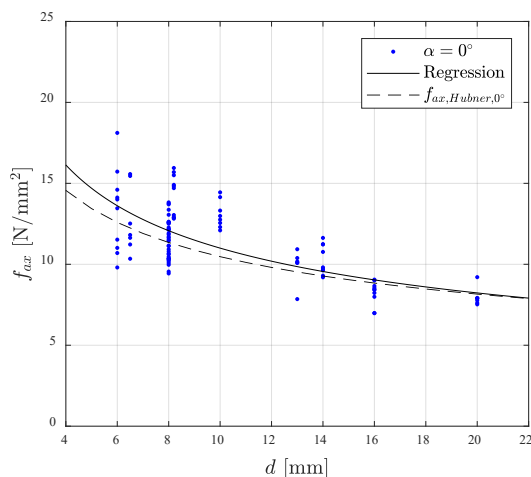


Abbildung 81: Regression des Einfluss des Schraubendurchmessers auf die Auszugsfestigkeit: Einschraubwinkel 0°

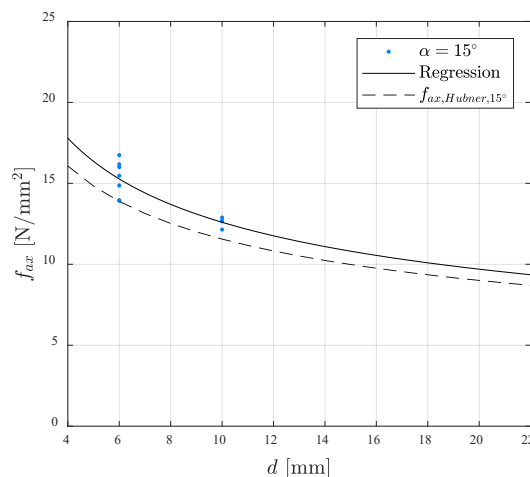


Abbildung 82: Regression des Einfluss des Schraubendurchmessers auf die Auszugsfestigkeit: Einschraubwinkel 15°

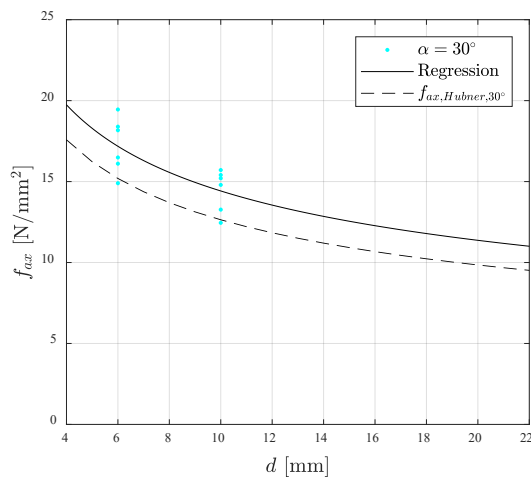


Abbildung 83: Regression des Einfluss des Schraubendurchmessers auf die Auszugsfestigkeit: Einschraubwinkel 30°

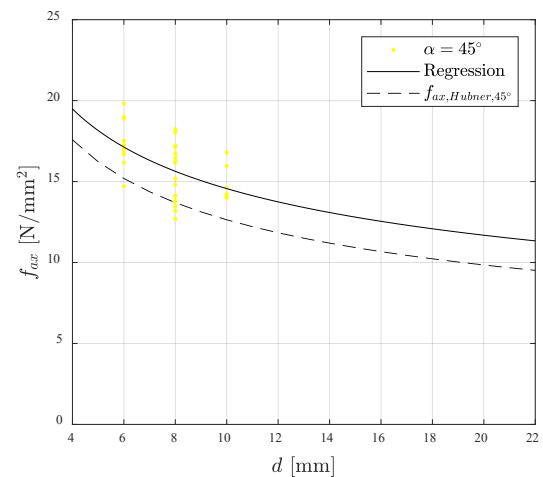


Abbildung 84: Regression des Einfluss des Schraubendurchmessers auf die Auszugsfestigkeit: Einschraubwinkel 45°

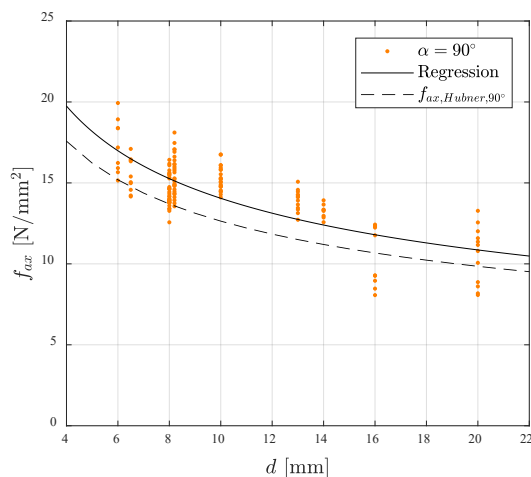


Abbildung 85: Regression des Einfluss des Schraubendurchmessers auf die Auszugsfestigkeit: Einschraubwinkel 90°

Der Einfluss des Schraubendurchmessers wird durch eine exponentielle Regression berücksichtigt:

$$f_{ax} = a \cdot d^b$$

Die folgenden Regressionsparameter können für verschiedene Einschraubwinkel bestimmt werden, wobei beachtet werden muss, dass jeweils nur eine geringe Anzahl an Prüfungen durchgeführt wurden:

Tabelle 18: Regressionsparameter für verschiedenen Einschraubwinkel

Winkel	d mm	a	b
0°	6-20	28.8	-0.42
15°	6, 10	30.0	-0.38
30°	6, 10	31.7	-0.34
37°	8	-	-
45°	6, 8, 10	30.3	-0.32
90°	6-20	33.1	-0.37

Hübner bestimmt die folgende Gleichung für die Auszugsfestigkeit

$$f_{ax,mean} = 0.824 \cdot 10^{-3} l_{ef}^{-0.035} \rho_{12}^{1.61} d^{-0.325} \begin{cases} 1 - 5,72 \cdot 10^{-3}(30^\circ - \alpha) & \text{für } 0^\circ \leq \alpha < 30^\circ \\ 1 & \text{für } 30^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ \end{cases}$$

Der Einfluss des Schraubendurchmessers ist in den durchgeführten Prüfungen etwas stärker ausgeprägt als nach Hübner, jedoch ist die geringe Anzahl an durchgeführten Prüfungen beachtet werden.

Im Weiteren wird zunächst der Einfluss des Winkels zwischen Schraubenachse und Faserrichtung evaluiert.

3.2.2.2 Einfluss des Winkels zwischen Schraubenachse und Faserrichtung

Der Grossteil der Ausziehprüfungen wurde für Einschraubwinkel 0° und 90° (parallel und rechtwinklig zur Faser) durchgeführt. In Richtung parallel zur Faser ist die Auszugsfestigkeit kleiner als bei anderen Winkeln, wie in Abbildung 86 dargestellt. Bei kleinen Einschraubwinkeln ist allgemein die Gefahr eines frühzeitigen Aufspaltens hoch. Für Einschraubwinkel grösser als 0° und insbesondere grösser als 30° zeigt sich allgemein nur ein geringer Einfluss auf die Auszugsfestigkeit.

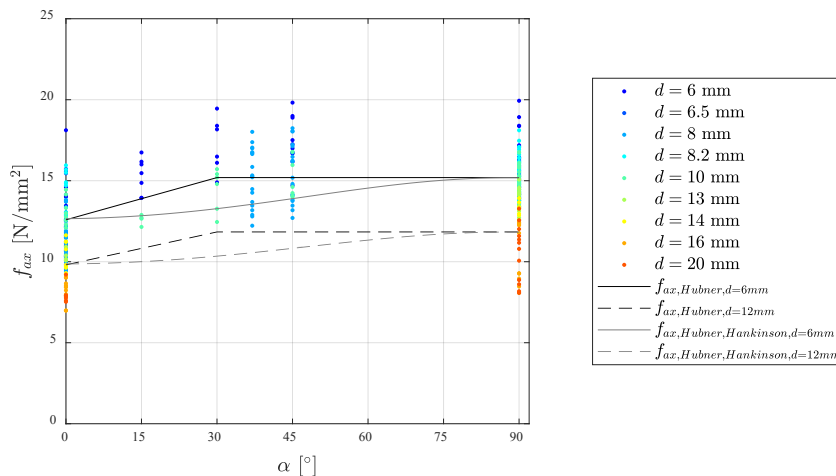


Abbildung 86: Einfluss des Einschraubwinkels auf die Auszugsfestigkeit; alle Ergebnisse sowie Unterteilung nach Schraubendurchmesser

Die Berücksichtigung des Einflusses des Faserwinkels durch einen Sinus und Cosinus Term scheint plausibel. Eine Vereinfachung stellt die bilineare Abminderung nach Hübner dar.

Für die Korrektur des Einflusses des Schraubendurchmessers wird der Einfluss des Schraubendurchmessers gemäss Hübner verwendet:

$$f_{ax,corr,d=12} = f_{ax,test} \left(\frac{12mm}{d_{test}} \right)^{-0.325}$$

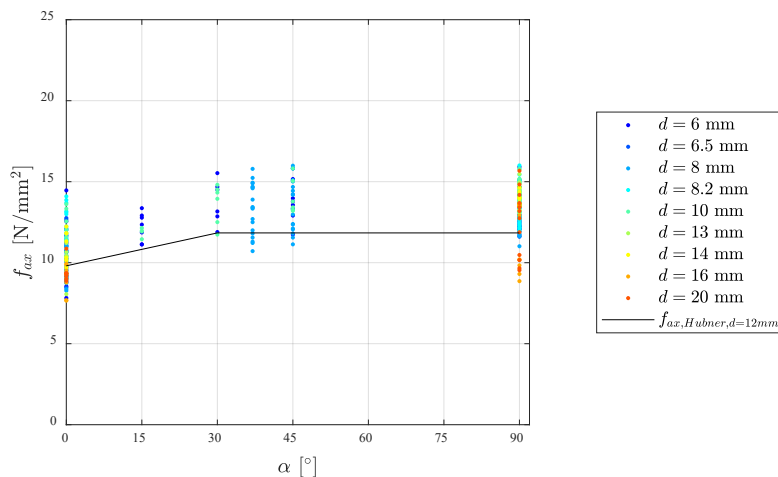


Abbildung 87: Einfluss des Einschraubwinkels auf die normierte Auszugsfestigkeit für $d = 12$ mm; alle Ergebnisse sowie Unterteilung nach Schraubendurchmesser

3.2.2.3 Einfluss der Dichte

Der Einfluss der Dichte auf die Auszugsfestigkeit ist in Abbildung 88 dargestellt. Der Grossteil der Dichten liegt zwischen 660 und 800 kg/m³ ($\rho = 734$ kg/m³, COV = 4.7%) mit einigen geringeren Werten bei ca. 625 kg/m³ sowie einigen höheren Werten bei ca. 825 kg/m³. Generell zeigt sich für den mittleren Bereich der Dichten nur einen geringer Einfluss der Dichte auf die Auszugsfestigkeit. Dabei muss die geringe Bandbreite und Streuung der Dichte berücksichtigt werden.

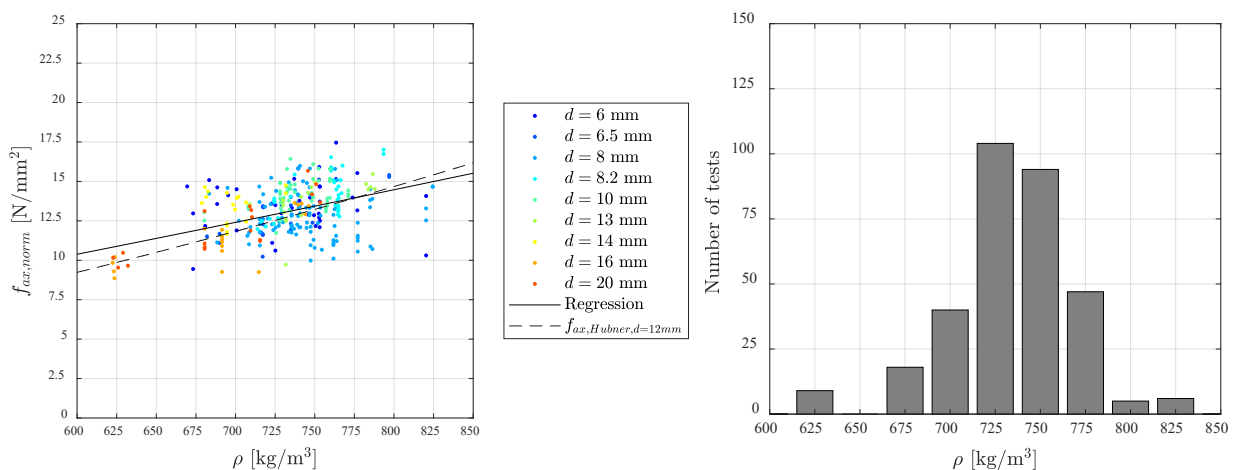


Abbildung 88: Einfluss des Vorbohrdurchmessers auf die Auszugsfestigkeit

Aus der Regression der Prüfdaten ergibt sich die folgende Dichtekorrektur:

$$f_{ax,700} = f_{ax} \left(\frac{700}{\rho} \right)^{1.15}$$

Hübner fand in seinen Versuchen für einen deutlich grösseren Bereich der Dichten einen deutlich höheren Exponenten von 1.61.

Im Folgenden wird aufgrund der deutlich grösseren Datenmenge und des besser verteilten Dichtebereiches die Dichtekorrektur der Versuchsdichten mit dem Exponenten nach Hübner angewandt.

3.2.2.4 Einfluss der Einschraub- / Nutsgewindelänge

Die Auszugsfestigkeit der Schrauben in Laubholz ist wesentlich höher als in Nadelholz. Dies erfordert eine geringere Einschraublänge, um den gleichen Auszieh Widerstand zu erreichen, der durch die Zugfestigkeit oder das Kopfdurchziehen der Schraube begrenzt ist. Ein ausgeprägter Einfluss der Einschraublänge auf die Auszugsfestigkeit konnte nicht beobachtet werden, wie in Abbildung 89 dargestellt.

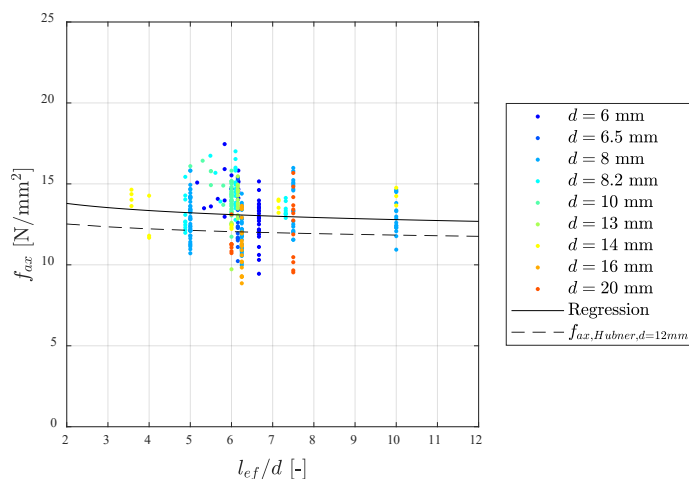


Abbildung 89: Einfluss der Einschraublänge auf die Auszugsfestigkeit, Werte normiert für $d = 12\text{mm}$ und $\alpha = 0^\circ$.

Gemäss Regression der Versuchswerte kann der Einfluss der Einschraublänge mit dem Exponenten -0.047 berücksichtigt werden.

Im Folgenden wird der Einfluss der Einschraublänge nicht weiter berücksichtigt.

3.2.2.5 Einfluss des Vorbohrdurchmessers

Der Einfluss des Vorbohrdurchmessers auf die Auszugsfestigkeit ist in Abbildung 90 dargestellt. Die Auszugsfestigkeit sinkt mit grösser werdendem Vorbohrdurchmesser leicht ab. In den einzelnen Tests ist die Auszugsfestigkeit der vorgebohrten Schrauben etwa 10-20% geringer im Vergleich zu den nicht vorgebohrten Schrauben. Diese Reduzierung ist mit einem deutlich geringeren Einschraubdrehmoment für vorgebohrte Schrauben und dem Mehraufwand für das Vorbohren zu vergleichen. Daneben ist insbesondere für grössere Schraubendurchmesser und geringe Einschraubwinkel bei Erreichen des Tragwiderstands eine deutliche Spaltneigung festzustellen. Die Gefahr des Aufspaltens wird dabei mit grösser werdendem Vorbohrdurchmesser leicht verringert. Für vorgebohrte Schrauben ist die Auszugsfestigkeit weitgehend unabhängig vom Vorbohrdurchmesser im Bereich des Bohrers $d_{\text{drill}} = 0.9-1.1 d_{\text{core}}$.

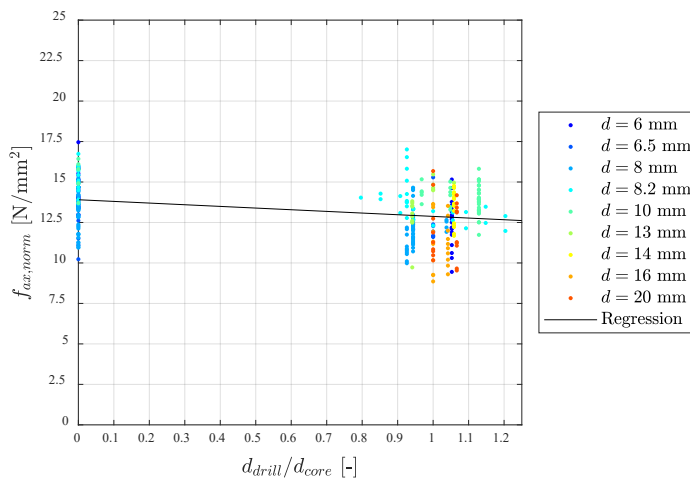


Abbildung 90: Einfluss des Vorbohrdurchmessers auf die Auszugsfestigkeit

Eine lineare Regression aller normierten Werte zeigt eine Abnahme um etwa 7.5% für einen Vorbohrdurchmesser gleich dem Kerndurchmesser.

$$f_{ax,norm,d=12} = 13.9 \left(1 - 0.074 \left(\frac{d_{\text{drill}}}{d_{\text{core}}} \right) \right) \quad [\text{N/mm}^2]$$

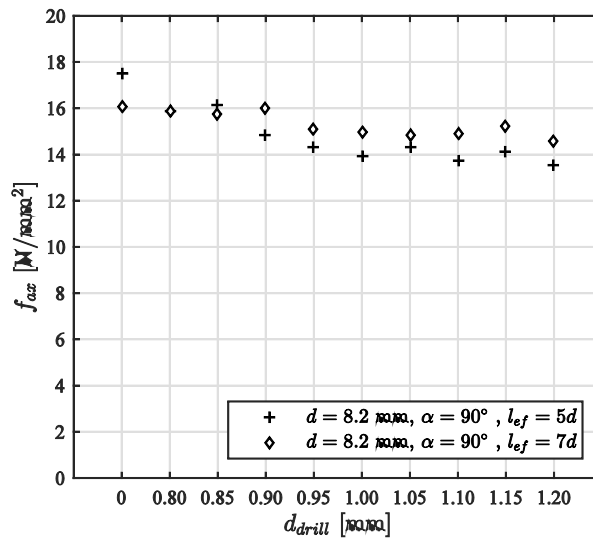


Abbildung 91: Einfluss des Vorbohrdurchmessers auf die Auszugsfestigkeit

3.2.3 Zusammenfassung

Zusammenfassen lässt sich feststellen, dass die von Hübner angegebenen Formeln zur Bestimmung der Auszugsfestigkeit in Eschen, Buchen und Robinienholz gute und konservative Abschätzungen der Versuchsergebnisse liefern. Fragen der Handhabung beim Einbringen der Schrauben, konservative Annahmen bezüglich der Gefahr des Auspalten etc. sind in diesem Fall zum Teil höher zu gewichten als eine genauere und präzisere Darstellung der Auszugsfestigkeiten.

3.3 Scherversuche

3.3.1 Allgemein

3.3.1.1 Bemessungsmodell

Der laterale Tragwiderstand einer Verbindung mit Schrauben kann durch Anteile aus Scherbeanspruchung der Verbindungsmittel und einem Anteil aus Reibung zwischen den Holzelementen beschrieben werden:

$$R_{\text{Verbindung}} = R_{\text{Scheren}} + R_{\text{Seileffekt}}$$

Bei ausreichender Holzstärke kann der Versagensmodus mit zwei Fließgelenken in den Holzelementen nach dem sogenannten European Yield Model wie folgt erreicht werden und der Anteil des Tragwiderstands aus der Scherbeanspruchung des Verbindungsmittels wie folgt beschrieben werden:

$$R_{\text{Scheren}} = \sqrt{\frac{2\beta}{1+\beta}} \sqrt{2M_y f_{h,1} d_{ef}}$$

wobei $\beta = f_{h,2} / f_{h,1}$ das Verhältnis zwischen der Lochleibungsfestigkeit f_h der Holzelemente, M_y das Fließmoment des Verbindungsmittels und d_{ef} der effektive Durchmesser der Schraube ist. Dieser effektive Durchmesser ist abhängig von der Lage des Fließgelenkes. Bei Vollgewindeschrauben und wenn der Schaftteil der Schraube einen größeren Abstand als $4d$ von der Scherebene zwischen den Elementen hat, ist der effektive Durchmesser $d_{ef} = 1,1 d_1$. In anderen Fällen ist der effektive Durchmesser gleich dem Durchmesser des Schaftes d_s .

Der Anteil der Seilwirkung ergibt sich zum einen aufgrund der Schrägstellung der Schrauben bei ansteigender Beanspruchung zu einer relativen Kontraktion, die zu Druckkräften zwischen den Holzteilen führt, und zum anderen zu einem direkten Beitrag aus der Zugkraftkomponente aus der Schrauben in Schrägstellung. Der Anteil des Seileffektes wird nach SIA 265 wie folgt beschrieben:

$$R_{\text{Seileffekt}} = \min(\mu R_{ax}; 1.0 \cdot R_{\text{Scheren}})$$

Das heisst, dass gemäss SIA 265 und auch EC5 der Seileffekt auf maximal den Anteil aus der Scherbeanspruchung des Verbindungsmittels beschränkt bleibt. Gerade für Schrauben mit geringem Kerndurchmesser und daher einem eher geringen Scherwiderstand kann diese Beschränkung den Tragwiderstand praktisch sehr stark limitieren.

Der Parameter μ ist in SIA 265 und EC5 mit 0.25 angegeben und kann als Reibbeiwert interpretiert werden. Je nach Materialien und Oberflächenbeschaffenheit können auch höhere Wert in Versuchen beobachtet werden.

3.3.1.2 Lochleibungsfestigkeit

In EC5 ist keine spezifische Lochleibungsfestigkeit für Schrauben angegeben. Es wird auf die Angaben für nicht vorgebohrte Nägel (im Falle von $d \leq 6$ mm) oder auf die Angaben von Bolzen (Stabdübel) (im Falle von $d > 6$ mm) verwiesen. Die von Whale und Smith abgeleiteten

Gleichungen für Nägel und Bolzen in Nadelholz und tropischen Hartholz sowohl für das Mittelwerts als auch charakteristischen Niveau wird wie folgt verwendet:

$$f_h = 0.082(1 - 0.01d)\rho$$

Eine detailliertere Auswertung der Testdaten durch Leijten et al. (2004) ergibt folgende Regressionsfunktion für Laubholz:

$$f_{h,mean} = 0.0871\rho_{mean}^{1.091}d^{-0.253}$$

Von Hübner wurde die folgende Lochleibungsfestigkeit für Stabdübel mit einem Durchmesser zwischen 6 und 20 mm auf Grundlage des Versagenskriteriums von 5 mm Eindrückung für Buchen-, Eschen- und Robinienholz wie folgt bestimmt:

$$f_{h,mean} = 3.20 \cdot 10^{-3} d^{-0.24} \rho_{mean}^{1.6}$$

Für Laubholz allgemein schlägt Hübner die folgende charakteristische Lochleibungsfestigkeit vor:

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{2,60 \cdot 10^{-3} d^{-0,20} \rho_k^{1,57}}{(1 - 0,48 d^{0,33}) \cos^3 \alpha + 0,48 d^{0,33}}$$

In SIA 265:2003 war der folgende Wert für die Lochleibungsfestigkeit in Hartholz (vorgebohrt) z.b. für Stabdübel angegeben:

$$f_{h,k} = 0.19\rho \cdot d^{-0.3}$$

Ein Vergleich der verschiedenen Gleichungen ist in Abbildung 17 dargestellt.

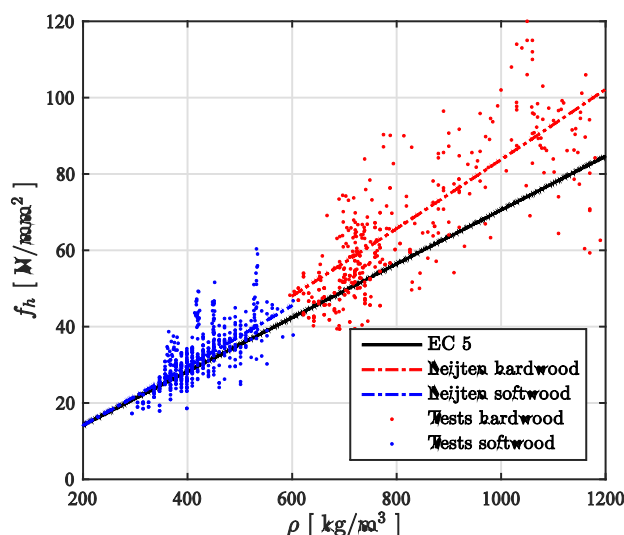


Abbildung 92: Vergleich der Lochleibungsfestigkeiten aus Leijten et al. (2004) mit darin vorgeschlagener Regression und mit Formel in EC5.

3.3.1.3 Fliessmoment

Für das Fliessmoment der Schrauben, das vornehmlich von der Schraubengeometrie und der Stahlqualität abhängt, sind in den zugehörigen ETAs die folgenden Werte angegeben.

Tabelle 19: Materialeigenschaften der Schrauben

Schraubentyp		d [mm]	$M_{y,k}$ [Nm]	f_{yk} [N/mm ²]	$f_{tens,k}$ [kN]
SFS	WT-T	6.2	12.7	990	14.4
	Powerfast	8	20.1	-	19.1
	WT-T	8.5	19.5	870	28.6
	WR-T	13	84.6	930	58.4
	WB	16			91.5*
	WB	20			145*
Würth	Assy	6	9.5		11.0
	Assy	8	20.0		20.0
	Assy	10	36.0		32.0
	Assy	14	86.0		62
Sherpa		8		$\geq 600^*$	

3.3.2 Ergebnisse

3.3.2.1 Versagensmechanismen

Nach Erreichen der Maximallast konnten verschiedene Versagensmechanismen beobachtet werden, wie in Abbildung 93 dargestellt:

- Zugversagen/Abscheren der Schrauben (nur bei Schrauben Würth ASSY Plus VG $d = 6$ mm beobachtet)
- Aufspalten des Holzes
- Blockscheren eines Holzteils vor den Schrauben
- Kombiniertes Versagen

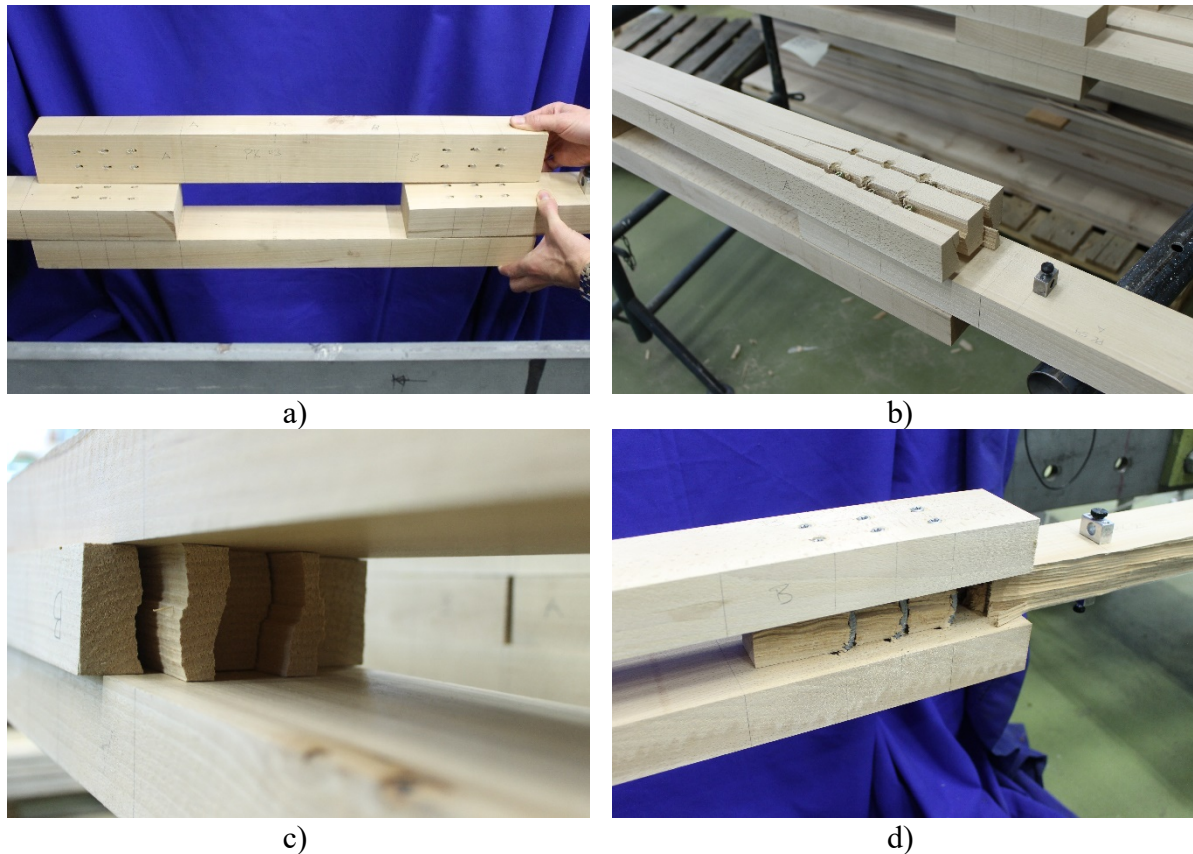


Abbildung 93: Beispiele verschiedener Versagensmechanismen

Die oben beschriebenen (spröden) Versagensmechanismen traten bei verschiedenen grossen Lastniveaus und Verformungen auf. Ziel einer optimalen Bemessung ist es, dass die spröden Versagensmechanismen erst nach einer ausreichend grossen duktilen Verformung auftreten, um eine ausreichende Lastverteilung innerhalb der Verbindung und zwischen verschiedenen Verbindungen zu ermöglichen. Gemäss EAD 130118-00-0603 soll die Verformung pro Verbindung mindestens 10 mm betragen innerhalb der die Last nicht unter 80% F_{\max} abfällt.

Übertragen auf die serielle Positionierung der Verbindungen beträgt die erforderliche Gesamtverformung mindestens 20 mm (zuzüglich der elastischen Verformung der Holzteile und Prüfmaschine).

3.3.2.2 Last-Verformungskurven

Im Folgenden sind die Last-Verformungskurven für die verschiedenen Versuchsserien dargestellt:

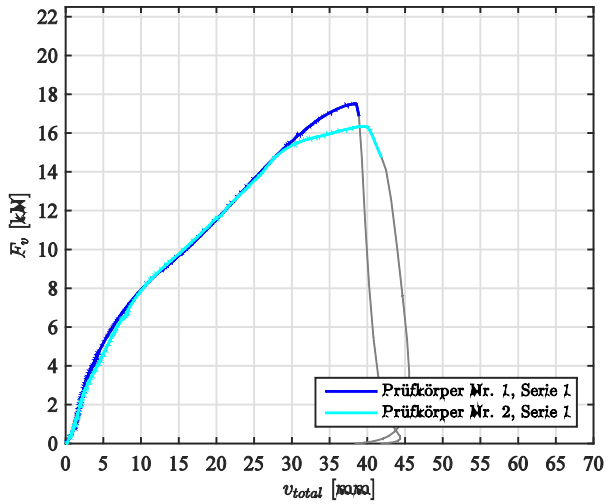


Abbildung 94: Serie 1

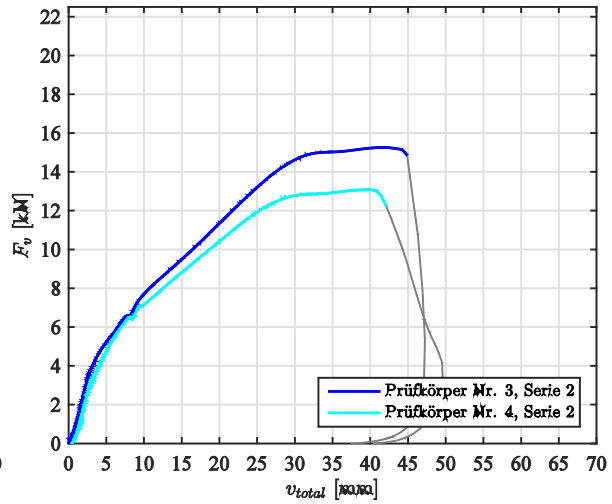


Abbildung 95: Serie 2

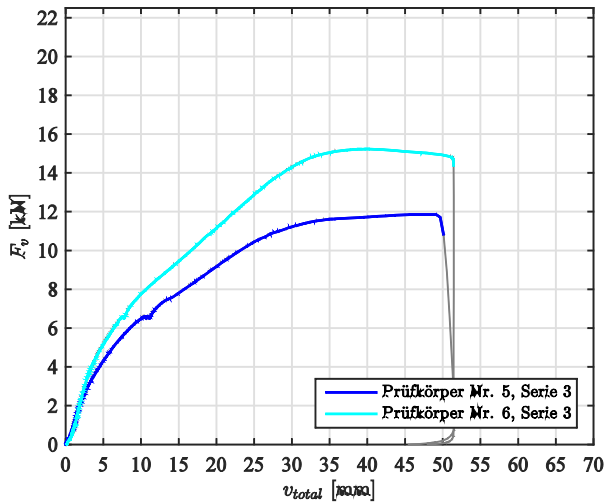


Abbildung 96: Serie 3

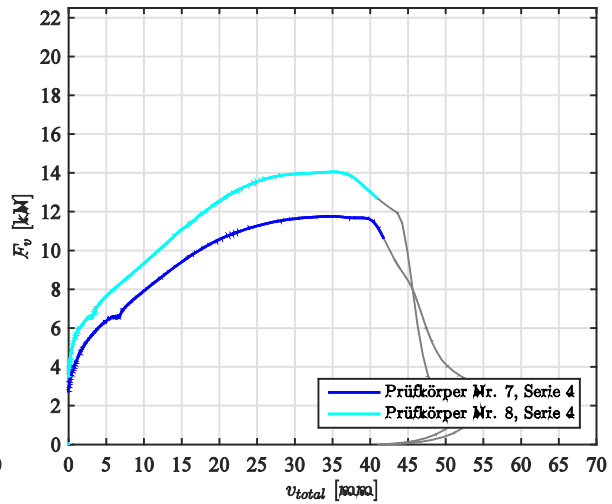


Abbildung 97: Serie 4

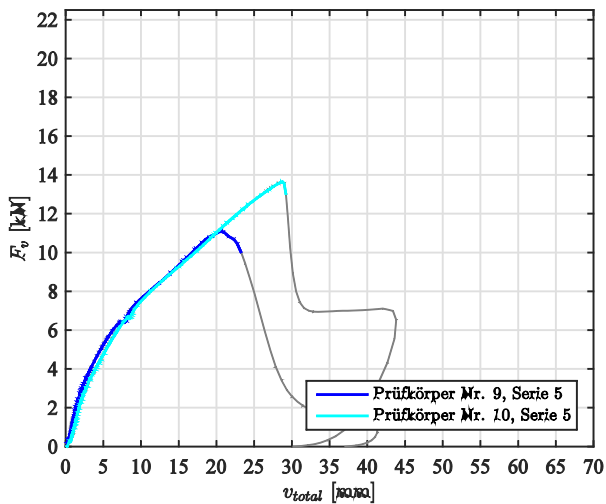


Abbildung 98: Serie 5

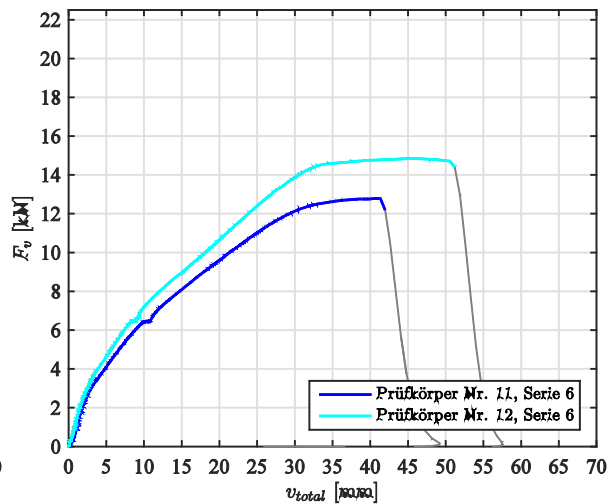


Abbildung 99: Serie 6

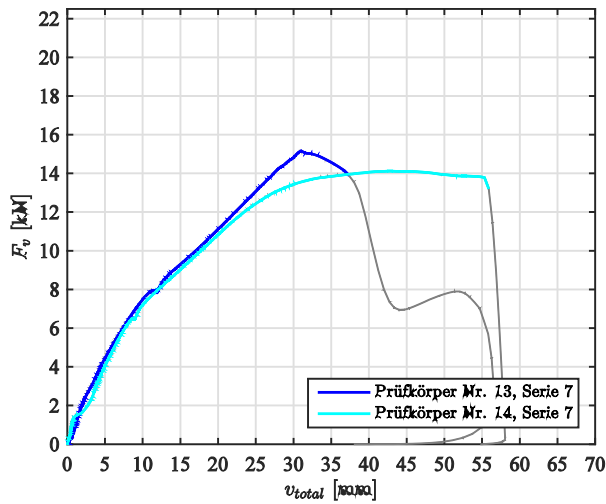


Abbildung 100: Serie 7

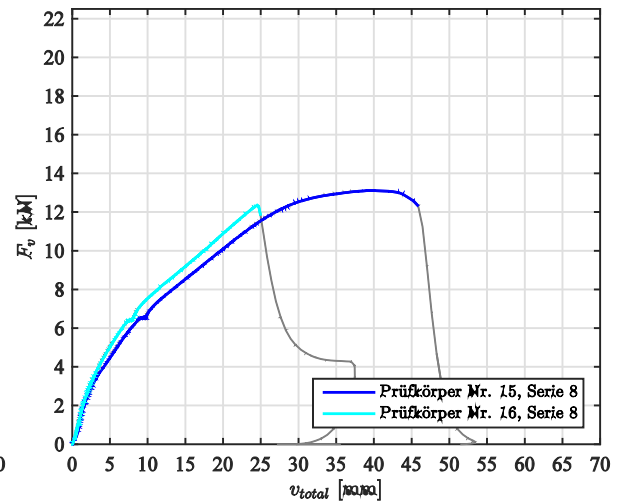


Abbildung 101: Serie 8

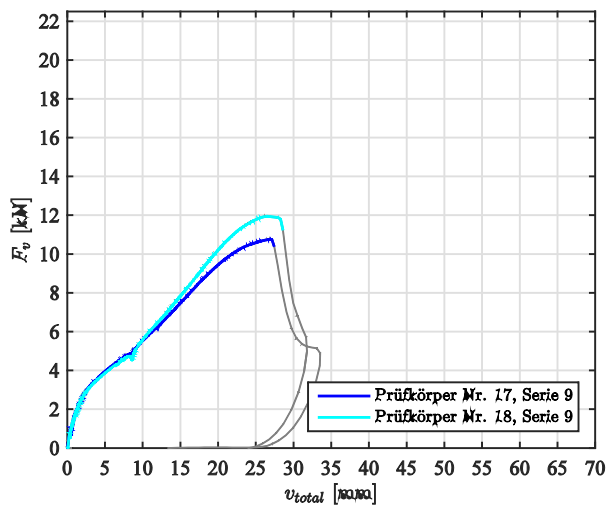


Abbildung 102: Serie 9

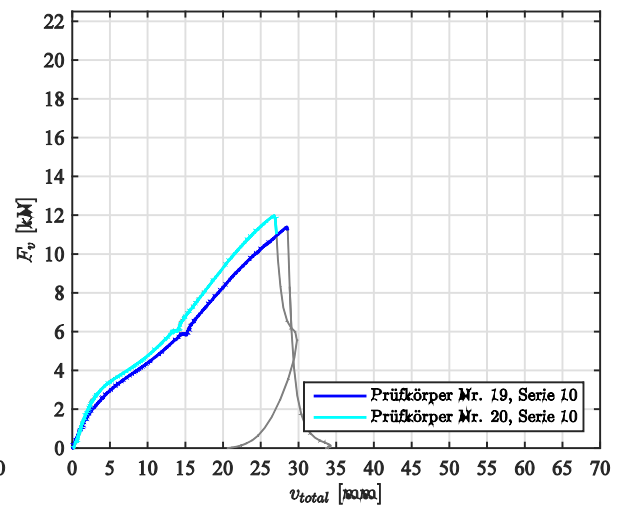


Abbildung 103: Serie 10

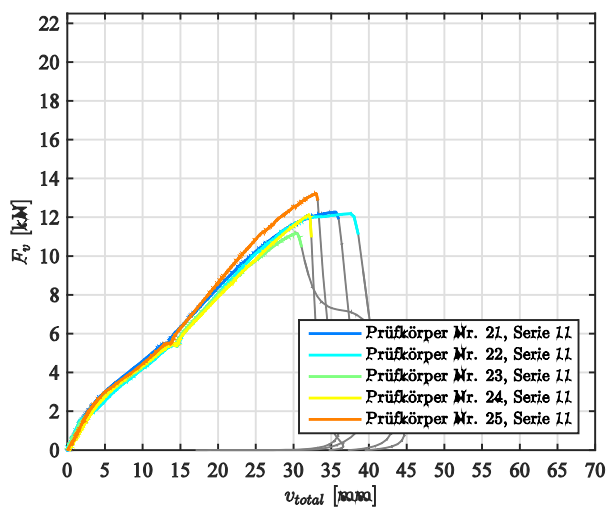


Abbildung 104: Serie 11

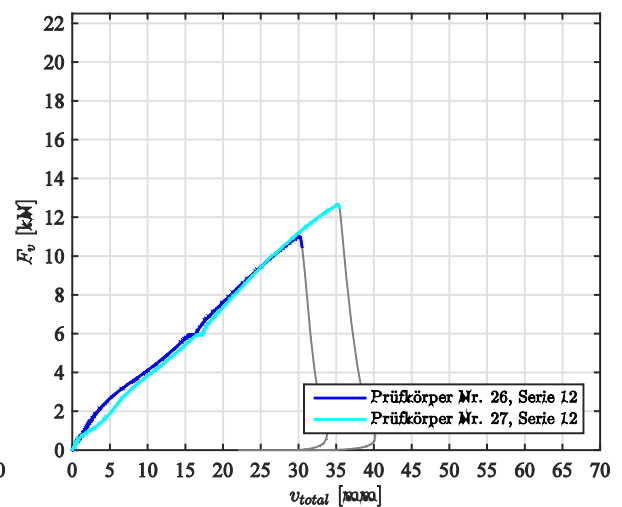


Abbildung 105: Serie 12

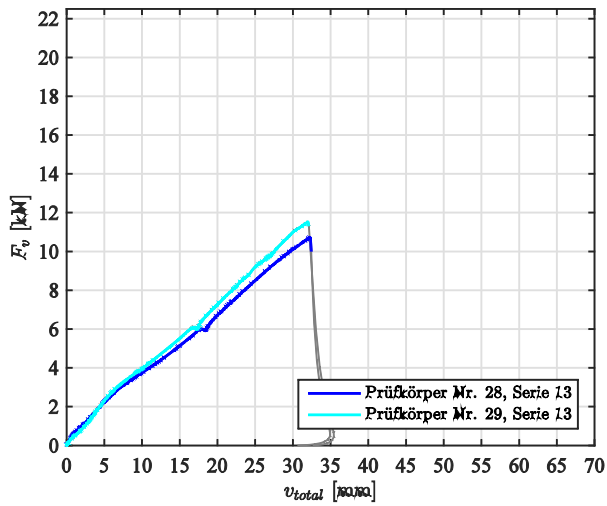


Abbildung 106: Serie 13

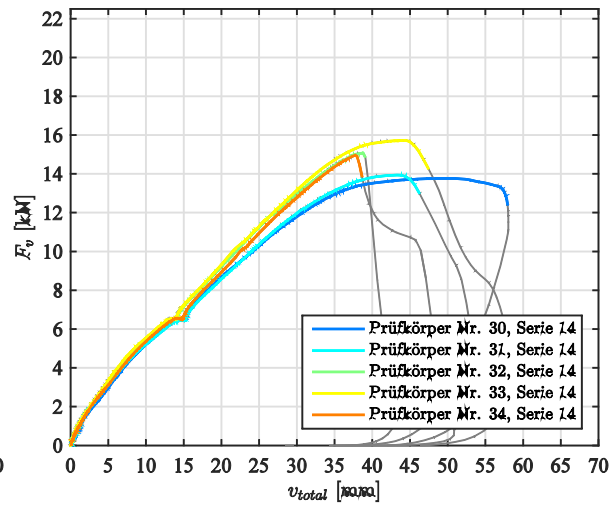


Abbildung 107: Serie 14

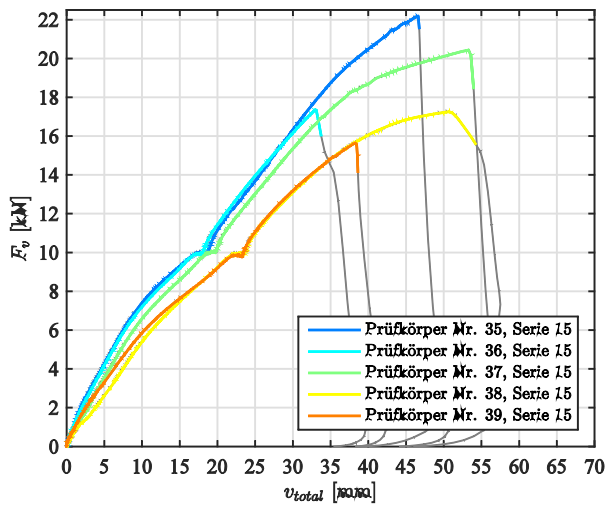


Abbildung 108: Serie 15

Tabelle 20: Konfiguration der Prüfkörper für die Scherversuche

Prüfk.-Nr.	d [mm]	ρ (MC) [kg/m ³] [%]				$F_{v,max}$ [kN]	$F_{v,max,corr}$ [kN]	Versag. im Holz
		A:	B:	O:	U:			
SFS								
1	8.2	761 (8.2)	759 (10)	764 (10.8)	757 (10.2)	17.5	15.3	A,O,U
2		746 (12.6)	736 (11.4)	751 (7.7)	749 (7.7)	16.3	14.8	B,O,U
3	8.2	732 (10.1)	731 (12.4)	743 (7.7)	742 (11.9)	15.3	14.1	A, O, U
4		715 (11.4)	712 (10.7)	683 (11.1)	660 (11.2)	13.1	13.3	B, O, U
5	8.2	629 (11.5)	630 (10.6)	636 (10.6)	636 (10.7)	11.9	13.9	A
6		722 (11.6)	721 (11)	708 (12.2)	707 (11)	15.2	14.7	A, O
7	8.2	626 (9.7)	607 (11.5)	635 (9.6)	634 (11.5)	11.8	14.1	A
8		716 (9.1)	718 (11.9)	704 (12.2)	701 (9.5)	14.1	13.8	B, U
9	8.2	761 (10.2)	759 (7.8)	736 (12)	746 (12.7)	11.1	9.9	A, O, U
10		716 (12.2)	716 (10.4)	693 (9.5)	689 (8.2)	13.7	13.5	O, U
11	8.2	696 (9.7)	692 (11.9)	691 (12.2)	694 (12.4)	12.8	13.0	B
12		724 (8.8)	722 (11.3)	725 (12.6)	726 (14)	14.8	14.1	B
13	8.2	814 (13.7)	809 (12.6)	778 (10.9)	784 (10.1)	15.2	12.3	O, U
14		716 (9.1)	718 (11.9)	721 (11)	721 (11)	14.1	13.5	B
15	8.2	687 (10.5)	689 (11.6)	686 (11.9)	685 (12.5)	13.1	13.5	A, O, U
16		720 (8.6)	712 (12.5)	719 (13.5)	718 (13.6)	12.4	11.9	A
Würth		A:	B:	O:	U:			
17	6	671 (8.8)	671 (8.8)	672 (8.6)	672 (8.6)	10.8	11.5	-
18	6	708 (7.9)	708 (7.9)	703 (10.7)	703 (10.7)	11.9	11.8	-
19	6	684 (9.4)	684 (9.4)	682 (8.2)	682 (8.2)	11.4	11.8	B
20	6	730 (9)	730 (9)	742 (8.8)	742 (8.8)	12.0	11.1	-
21	6	661 (8.5)	661 (8.5)	660 (7.9)	660 (7.9)	12.3	13.5	B
22	6	684 (9)	684 (9)	680 (9.1)	680 (9.1)	12.2	12.7	U
23	6	694 (9.5)	694 (9.5)	698 (12.2)	698 (12.2)	11.2	11.3	O, U
24	6	721 (9.9)	721 (9.9)	721 (8)	721 (8)	12.1	11.6	A
25	6	762 (9.6)	762 (9.6)	761 (7.5)	761 (7.5)	13.2	11.5	-
26	6	692 (9)	692 (9)	687 (9.6)	687 (9.6)	11.0	11.3	B, U
27	6	740 (11.2)	740 (11.2)	745 (9.5)	745 (9.5)	12.7	11.5	A
28	6	679 (9)	679 (9)	677 (8.1)	677 (8.1)	10.7	11.3	B
29	6	709 (8.5)	709 (8.5)	714 (7.6)	714 (7.6)	11.5	11.2	B
30	8	676 (8.4)	674 (8.5)	672 (8)	677 (10.8)	13.8	14.6	A, O, U
31	8	684 (9)	683 (8.9)	680 (9.9)	683 (8.9)	13.9	14.5	B, O, U
32	8	697 (9)	695 (8.7)	701 (10.2)	698 (10.6)	15.1	15.2	B, U
33	8	703 (10.3)	710 (8.8)	700 (10.3)	709 (9.5)	15.7	15.5	O, U
34	8	734 (9.6)	733 (8.7)	735 (12)	734 (10.4)	15.0	13.9	B, U
35	10	769 (9.8)	765 (8.5)	785 (10.9)	786 (11.1)	22.2	18.8	A
36	10	729 (8)	730 (8.8)	741 (9.5)	732 (9.5)	17.4	16.1	B
37	10	722 (8.5)	706 (9)	714 (9.1)	714 (8.3)	20.4	19.8	O, U
38	10	654 (10.2)	673 (9.3)	651 (10)	655 (9.8)	17.3	19.0	O
39	10	644 (8.2)	633 (9.7)	640 (11)	642 (10.6)	15.7	18.1	A

3.3.2.3 Dichtekorrektur der Tragwiderstände

Die Dichte des Holzes hat nur einen eher geringen Einfluss auf den Anteil des Scherwiderstands des Verbindungsmittels (Exponent ~ 0.5), jedoch einen sehr hohen Einfluss auf den Anteil der Seilwirkung infolge des Ausziehwidestands der Schrauben (Exponent ~ 1.6 nach Hübner). Um die zum Teil deutlichen Dichteunterschiede zwischen den Prüfkörpern zu berücksichtigen wurde der maximale Tragwiderstand pro Verbindungsmittel und Scherfuge $F_{v,max}$ wie folgt korrigiert:

$$F_{v,max,corr} = F_{v,max} \left(\frac{700 \text{ kg/m}^3}{\rho_{mean}} \right)^{1.6}$$

Diese recht starke Dichtekorrektur führt zu sehr homogenen Maximallasten, wie in Tabelle 20 angegeben, und zu guten Übereinstimmung der Last-Verformungskurven, wie in den folgenden Abbildungen zu sehen.

3.3.2.4 Einfluss der Rand und Zwischenabstände rechtwinklig zur Faser

Der Einfluss der Rand und Zwischenabstände auf den Tragwiderstand wurde in den Serien 1, 2, 7 und 3 untersucht. In Abbildung 109 sind die dichtekorrigierten Last-Verformungskurven dargestellt. Es zeigt sich, dass mit zunehmendem Randabstand das Verformungsvermögen der Verbindungen ansteigt. Einen Ausreisser stellt Prüfkörper 13 der Serie 7 dar, der eine extrem hohe Dichte aufwies und infolge Schrägfasrigkeit im oberen Seitenholz versagte. Der zweite Prüfkörper Nr. 14 der Serie 7 zeigt das höchste Verformungsvermögen. Grundsätzlich zeigen alle Prüfkörper mit Ausnahme von Prüfkörper 13 ein ausgeprägtes bzw. beginnendes „Fließen“.

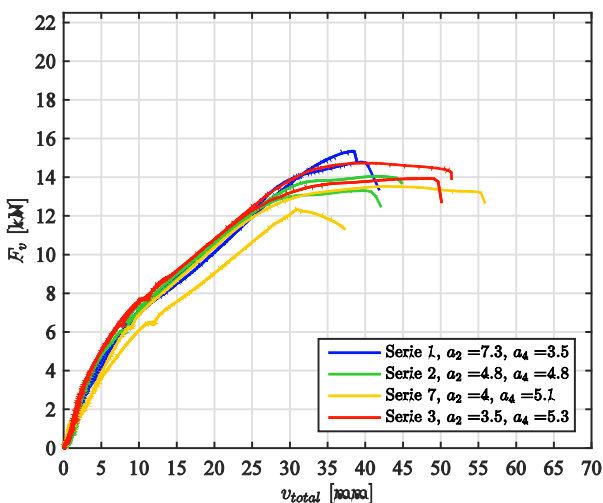


Abbildung 109: Dichte korrigierte Last-Verformungskurven zum Einfluss der Rand- und Zwischenabstände rechtwinklig zur Faser.

3.3.2.5 Einfluss der Zwischenabstände parallel zur Faser

Der Einfluss der Zwischenabstände parallel zur Faser auf den Tragwiderstand wurde in den Serien 2 und 4 untersucht. In Abbildung 110 sind die dichtekorrigierten Last-Verformungskur-

ven dargestellt. Die beiden Prüfkörper der Serie 4 zeigen einen Fehler in der Messung der Verformung, die erst verspätet einsetzt. Beide Serien erreichen den gleichen Tragwiderstand und bei beiden Serien ist ein „Fließen“ der Verbindung zu erkennen. Eine Reduzierung des Tragwiderstands infolge reduzierter Zwischenabstände ist nicht zu erkennen.

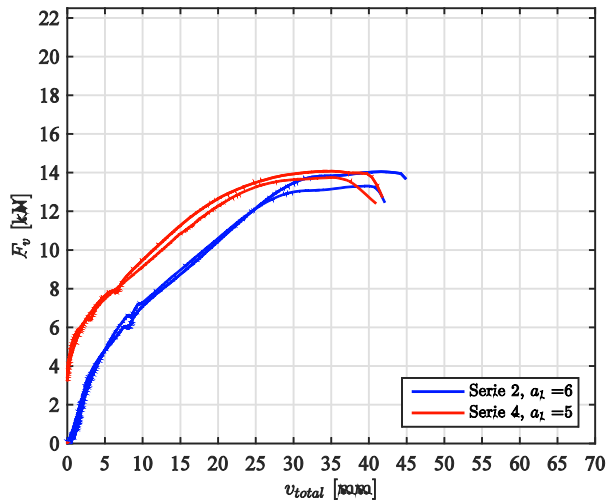


Abbildung 110: Dichte korrigierte Last-Verformungskurven zum Einfluss der Zwischenabstände parallel zur Faser.

3.3.2.6 Einfluss des Endabstandes parallel zur Faser

Der Einfluss des Endabstandes parallel zur Faser auf den Tragwiderstand wurde in den Serien 2 und 5 untersucht. In Abbildung 111 sind die ditekorigierten Last-Verformungskurven dargestellt. Der Tragwiderstand der Serie 5 mit reduzierten Tragwiderstand ist deutlich geringer und das Versagen tritt spröde infolge Aufspalten auf. Ein „Fließen“ d.h. die vollge Beanspruchung der Verbindungsmittel ist nicht erreicht.

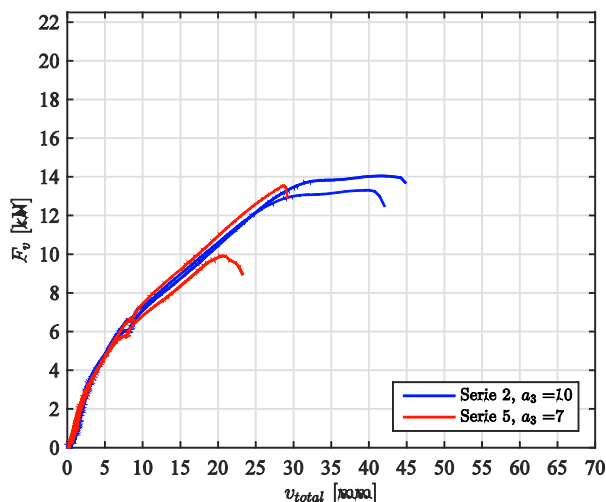


Abbildung 111: Dichte korrigierte Last-Verformungskurven zum Einfluss des Endabstandes parallel zur Faser.

3.3.2.7 Einfluss der Holzbreiten

In den Serien 2 und 8 bzw. 3 und 6 wurde der Einfluss reduzierten Holzbreiten untersucht. Dabei wurde der Zwischenabstand rechtwinklig zur Faser konstant gehalten und der Randabstand entsprechend der Holzbreite reduziert. In Abbildung 112 und Abbildung 113 sind die dichtekorrigierten Last-Verformungskurven dargestellt. Mit Ausnahme des Prüfkörpers 16 in Serie 8 zeigt sich kein deutlicher Einfluss der reduzierten Holzbreiten auf den Tragwiderstand. Ein „Fließen“ d.h. die volle Beanspruchung der Verbindungsmittel ist in allen Prüfkörpern mit Ausnahme Nr. 16 erreicht.

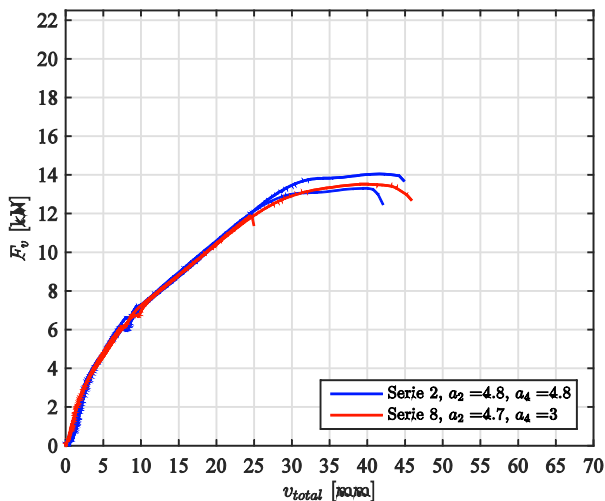


Abbildung 112: Dichte korrigierte Last-Verformungskurven zum Einfluss der Holzbreiten bei konstantem Zwischenabstand rechtwinklig zur Faser.

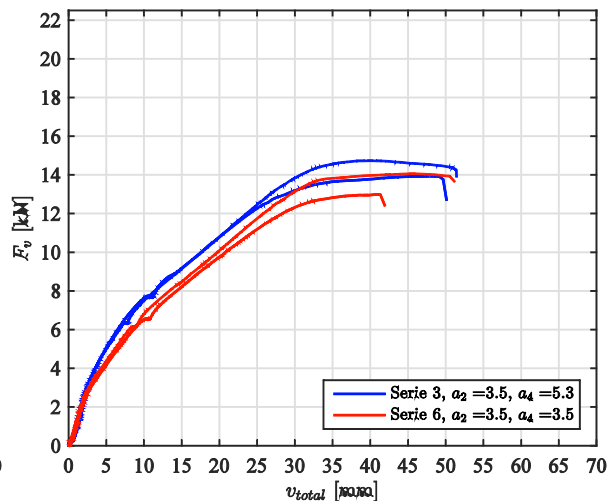


Abbildung 113: Dichte korrigierte Last-Verformungskurven zum Einfluss der Holzbreiten bei konstantem Zwischenabstand rechtwinklig zur Faser.

3.3.2.8 Gruppeneffekt

Der Einfluss eines Gruppeneffektes infolge der Anzahl Verbindungsmittel hintereinander wurde in den Serien 9-13 untersucht. In Abbildung 115 sind einige der Prüfkörper vor dem Versuch dargestellt und in Abbildung 114 sind die dichtekorrigierten Last-Verformungskurven angegeben.

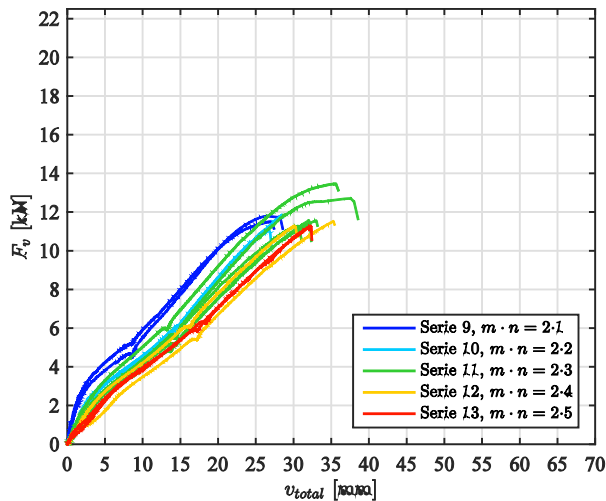


Abbildung 114: Dichte korrigierte Last-Verformungskurven zum Einfluss der Anzahl Verbindungsmittel

Die Ergebnisse der Versuchsreihe mit den dichtekorrigierten Traglasten in Tabelle 21 zeigt, dass kein Einfluss der Anzahl der Verbindungsmittel hintereinander zu beobachten ist. Der Grossteil der Versuche versagte infolge Zugversagen der Schrauben.

Tabelle 21: Einfluss der Anzahl Verbindungsmittel in Kraftrichtung hintereinander auf die Tragwiderstand der Scherverbindung

Prüfk.-Nr.	d [mm]	$m \times n$ [-]	$F_{v,max}$ [kN]	$F_{v,max,corr}$ [kN]	Mittelwert der Serie	
Würth						
17	6	2 x 1	10.8	11.5	11.6	100%
18	6	2 x 1	11.9	11.8		
19	6	2 x 2	11.4	11.8		
20	6	2 x 2	12.0	11.1	11.4	98%
21	6	2 x 3	12.3	13.5		
22	6	2 x 3	12.2	12.7		
23	6	2 x 3	11.2	11.3	12.1	104%
24	6	2 x 3	12.1	11.6		
25	6	2 x 3	13.2	11.5		
26	6	2 x 4	11.0	11.3	11.4	98%
27	6	2 x 4	12.7	11.5		
28	6	2 x 5	10.7	11.3		
29	6	2 x 5	11.5	11.2	11.3	97%



Abbildung 115: Prüfkörperserien mit verschiedener Anzahl Verbindungsmittel

3.3.2.9 Einfluss der Durchmesser

In den Serien 11, 14 und 15 wurde der Einfluss des Schraubendurchmessers untersucht. Dabei wurden die Rand- und Zwischenabstände rechtwinklig zur Faser ähnlich gewählt. In Abbildung 116 sind die dichte korrigierten Last-Verformungskurven dargestellt. Grundsätzlich zeigt sich der Anstieg des Tragwiderstands mit steigendem Schraubendurchmesser. Das Verformungsvermögen der Verbindung steigt von Durchmesser 6 mm auf 8 mm deutlich an. Dies ist u.a. durch den veränderten Versagensmechanismus zu erklären, da bei Durchmesser 6 mm häufig ein Zugversagen der Schrauben auftrat. Bei Grösseren Durchmessern kommt es hingegen zu einem Ausziehen der Schrauben aus den Seitenholzteilen. Ein „Fliesen“ d.h. die volle Beanspruchung der Verbindungsmittel auf Ausziehen ist in den Reihen 14 und 15 nicht bei allen Prüfkörpern erreicht.

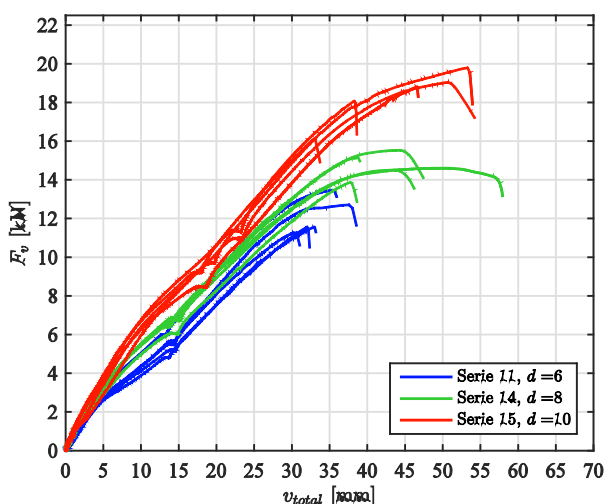


Abbildung 116: Dichte korrigierte Last-Verformungskurven zum Einfluss des Schraubendurchmessers.

3.3.2.10 Beurteilung des Tragwiderstands

Aufgrund der Form der Last-Verformungskurven kann der Anteil des Tragwiderstands aus dem Scherwiderstand der Schrauben sowie der Anteil infolge Seilwirkung abgeschätzt werden. Der Scherwiderstand wird als der Schnittpunkt der Tangenten am ersten linearen Bereich sowie am zweiten, annähernd linearen Bereich der Lastverformungskurve definiert. Der Anteil infolge Seilwirkung wird als die Differenz zwischen maximaler Last und Scherwiderstand berechnet. Entsprechend können die jeweiligen Beiträge zum Gesamttragwiderstand beurteilt werden. Die abgeschätzten Anteile sind in Tabelle 22 aufgeführt. Es zeigt sich, dass der Anteil der Seilwirkung einen deutlich höheren Anteil am Tragwiderstand hat verglichen mit dem Scherwiderstand. Die Limitierung des Anteils der Seilwirkung auf 100% des Scherwiderstandes gemäss Norm führt zu einer deutlichen Unterschätzung des Tragwiderstands. Um die Schrauben wirtschaftlicher zu bemessen könnte die volle Seilwirkung angesetzt werden.

Tabelle 22: Mittlere Korrigierte Tragwiderstände sowie Anteile des Scherwiderstands und der Seilwirkung

Reihe und Prüfkörper-Nr.	d [mm]	$F_{max,corr}$ [kN]	F_{scher} [kN]	F_{seil} [kN]	F_{seil}/F_{scher} [-]	$R_{Absch,mean}$ [kN]	$\Delta R_{seil,mean}$ [kN]
SFS WT-T							
Serie 1: 1,2	8.2	15.1	5.4	9.7	1.8	4,5	8,9
Serie 2: 3,4	8.2	13.7	5.3	8.4	1.6	4,5	8,9
Serie 3: 5,6	8.2	14.3	5.9	8.5	1.5	4,5	8,9
Serie 4: 7,8	8.2	13.9	-	-	-	4,5	8,9
Serie 5: 9,10	8.2	11.7	5.4	6.3	1.2	4,5	8,9
Serie 6: 11,12	8.2	13.5	4.9	8.6	1.8	4,5	8,9
Serie 7: 13,14	8.2	12.9	4.6	10.6	1.7	4,5	8,9
Serie 8: 15,16	8.2	12.7	5.3	7.4	1.4	4,5	8,9
Würth ASSY Plus VG							
Serie 9: 17,18	6	11.6	3.1	8.5	2.8	2,8	5,5
Serie 10: 19,20	6	11.4	2.5	9.0	3.6	2,8	5,5
Serie 11: 21-25	6	12.1	2.3	9.8	4.4	2,8	5,5
Serie 12: 26,27	6	11.4	2.5	8.9	3.6	2,8	5,5
Serie 13: 28,29	6	11.3	2.8	8.4	3.0	2,8	5,5
Serie 14: 30-34	8	14.7	2.8	12.0	4.5	4,8	8,7
Serie 15: 35-39	10	18.4	4.6	13.8	3.2	6,7	10,2

In Tabelle 22 ist ersichtlich, dass das Verhältnis der Anteile aus Seilwirkung und Scherwiderstand für die Schrauben SFS WT-T 8.2 im Vergleich zu den Würth Assy VG Schrauben geringer ist. Dies könnte durch den verdickten Mittelteil der SFS WT-T Schrauben erklärt werden, der zu einer deutlich höheren Scheranteil der Schrauben im Vergleich zu den Vollgewindeschrauben mit durchgängig kleinem Kerndurchmesser führt.

Die anhand der Bemessungsgleichungen berechneten erwarteten Widerstände sind in den letzten beiden Spalten der Tabelle 22 angegeben. Der erwartete Scherwiderstand $R_{Absch,mean}$ wurde

mit den mittleren Lochleibungsfestigkeiten nach Hübner sowie einem um 20% über dem charakteristischen Wert abgeschätzten Biegemomentes berechnet. Die erwarteten Werte stimmen für die Schrauben SFS WT-T gut mit den im Versuch beobachteten Werten überein. Für die Schrauben Assy Plus VG sind die erwarteten Werte der Scherwiderstände zum Teil höher als die beobachteten Werte. Dies kann unter anderem an der sehr vereinfachten Abschätzung des Scherwiderstandes aus den Versuchsdaten liegen.

Der erwartete Wert der Anteil der Seilwirkung $\Delta R_{seil,mean}$ wurde aus dem Minimum des Auszugswiderstands nach Hübner sowie der Zugfestigkeit der Schrauben unter Verwendung eines Reibbeiwertes von $\mu = 0,5$ berechnet. Eine Deckelung auf 100% des Scherwiderstandes wurde nicht vorgenommen.

Der Vergleich der erwarteten Werten mit den im Versuch beobachteten Werten zeigt allgemein eine gute Übereinstimmung. Für die Bemessung ist allenfalls eine reduzierte Reibung zwischen den Holzteilen zu berücksichtigen.

3.3.3 Schlussfolgerung

Um einen ausreichenden Tragwiderstand von Schraubenverbindungen zu gewährleisten, d.h. ein frühzeitiges Versagen im Holz infolge Aufspalten oder Ausscheren zu vermeiden sollten die folgenden Mindestabstände eingehalten werden:

Tabelle 23: Vorschlag der Abstände für vorgebohrte Schrauben

a_1/d	a_3/d	a_2/d	a_4/d
[-]	[-]	[-]	[-]
6	10	3.5	3.5

Potential für die Steigerung des Tragwiderstands von Schrauben in Buchenholz liegt vor allem in der Anpassung der Bemessungsregeln um den vollen Anteil der Seilwirkung mit zu Berücksichtigen.

4 Empfehlungen für die Bemessung

4.1 Allgemeines

Die Angaben für die Bemessung beziehen sich auf Schrauben nach SN EN 14592 mit gewaltem oder geschmiedetem Gewinde: Zu diesem Schraubentyp gehören die Vollgewindeschrauben und Schrauben mit Schaft, wobei der Durchmesser des Schafts geringer ist als der grösste Aussendurchmesser des Gewindes. Schraubenverbindungen mit diesen Holzschrauben werden sowohl ohne Vorbohrung wie auch mit Vorbohrung ausgeführt. Vorbohrungen sind mit dem Gewindekerndurchmesser d_1 auszuführen.

Schraubenverbindungen ohne Vorbohrung sind in Vollholz oder Brettschichtholz aus Buche bis zu einer Einschraublänge von $15 \cdot d$ zulässig. Schrauben mit längeren effektiven Gewindelängen in Buchenholz sind generell vorzubohren. Ausgenommen sind Schrauben mit besonderer Eignung für Laubholz.

4.2 Beanspruchung rechtwinklig zur Schaftichtung

Der Bemessungswert des Tragwiderstands $R_{d,Verb}$ einer einschnittigen Schraubenverbindung für Schrauben gemäss SN EN 14592 mit Nenndurchmessern d von 6 mm bis 20 mm darf bei Einhaltung der Holzdicken und Einschraubtiefen sowie für $\eta_w = 1,0$ und $\eta_t = 1,0$ wie folgt ermittelt werden:

$$R_{d,Verb} = R_{d,Absch} + \Delta R_{d,Seilw} = k_\alpha k_{red} n_{tot} k_\beta \sqrt{M_{u,k} f_{h,k} d_{ef}} + \Delta R_{d,Seilw}$$

$R_{d,Absch}$ Bemessungswert des Tragwiderstands einer einschnittigen Schraubenverbindung bei Beanspruchung rechtwinklig zur Schaftichtung ohne Berücksichtigung der Seilwirkung

k_α Hilfswert $k_\alpha = 0,73$

k_{red} Reduktionsbeiwert gemäss Norm SIA 265:2012 Ziffer 6.1.4.2

n_{tot} Gesamtanzahl Schrauben der Schraubenverbindung

k_β Hilfswert, abhängig von der Ausbildungsform und dem Verhältnis der Lochleibungsfestigkeiten der zu verbindenden Fügeile

$k_\beta = \sqrt{\frac{4\beta_f}{1+\beta_f}}$ für Holz-Holz-Verbindungen

$k_\beta = \sqrt{2}$ für Stahl-Holz-Verbindungen mit aussenliegenden Blechen und für Holz-Holz-Verbindungen mit gleichen Lochleibungsfestigkeiten ($\beta_f = 1$)

Sind die Einschraubtiefe s und/oder die Holzdicke t_1 kleiner als die erforderlichen Abmessungen s_{erf} bzw. $t_{1,erf}$, müssen die Beiwerte k_β proportional abgemindert werden. Wird sowohl die

Einschraubtiefe s als auch die Holzdicke t_1 reduziert, muss mit dem kleineren der beiden Verhältnisswerte abgemindert werden.

β_f	Verhältnis der charakteristischen Werte der Lochleibungsfestigkeiten $f_{h,2,k} / f_{h,1,k}$
$M_{u,k}$	charakteristischer Wert des Fliessmoments der Schraube gemäss SN EN 14592 (Herstellerangabe) oder gemäss Norm SIA 265:2012 Ziffer 6.1.4.4 mit $d = d_{ef}$
$f_{h,k}$	charakteristischer Wert der Lochleibungsfestigkeit in N/mm ² mit $d = d_{ef}$

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{2,60 \cdot 10^{-3} d^{-0,20} \rho_k^{1,57}}{(1 - 0,48 d^{0,33}) \cos^3 \alpha + 0,48 d^{0,33}}$$

Bei Holz-Holz-Verbindungen ist $f_{h,1,k}$ einzusetzen.

$f_{h,1,k}$	charakteristischer Wert der Lochleibungsfestigkeit des Holzes auf der Schraubenkopfseite
$f_{h,2,k}$	charakteristischer Wert der Lochleibungsfestigkeit des Holzes auf der Seite der Schraubenspitze

d_{ef}	rechnerisch wirksamer Schraubendurchmesser
----------	--

Liegt die Scherfuge mindestens $4d$ vom Gewindebereich entfernt, ist $d_{ef} = d_s$ (Schnittebene im Schaft), andernfalls, ist $d_{ef} = 1,1 d_1$ (Schnittebene im Gewinde).

d_s	Schaftdurchmesser der Schraube
d_1	Gewindekerndurchmesser der Schraube
d	Nenndurchmesser der Schraube in mm

$\Delta R_{d,Seilw}$	Anteil, der die Seilwirkung berücksichtigt:
----------------------	---

$$\Delta R_{d,Seilw} = \mu R_{ax,d}$$

Der Reibbeiwert beträgt $\mu = 0,25$.

Wird der Anteil der Seilwirkung berücksichtigt, muss die wirksame Gewindelänge l_{ef} mindestens $6d$ betragen.

$R_{ax,d}$	Bemessungswert des Ausziehwidestands der Schraubengruppe.
------------	---

Die erforderliche Holzdicke $t_{1,erf}$ beträgt bei Holz-Holz-Verbindungen:

$$t_{1,erf} = 1,15 \left(2 \sqrt{\frac{\beta_f}{1 + \beta_f}} + 2 \right) \sqrt{\frac{M_{u,k}}{f_{h,1,k} d_{ef}}}$$

Die erforderliche Einschraubtiefe s_{erf} beträgt bei einschnittigen Holz-Holz-Verbindungen:

$$s_{erf} = 1,15 \left(2 \sqrt{\frac{1}{1 + \beta_f}} + 2 \right) \sqrt{\frac{M_{u,k}}{f_{h,2,k} d_{ef}}}$$

Die erforderliche Einschraubtiefe s_{erf} beträgt bei einschnittigen Stahl-Holz-Verbindungen:

$$s_{erf} = 1,15(2 + \sqrt{2}) \sqrt{\frac{M_{u,k}}{f_{h,2,k} d_{ef}}}$$

Die Mindestholzdicken t gemäss den Tabellen 32 und 33 und die Mindesteinschraubtiefe $s = 6d$ dürfen nicht unterschritten werden.

t_1 Holzdicke auf der Schraubenkopfseite

t_2 Holzdicke auf der Seite der Schraubenspitze

Bei Schraubenverbindungen mit Holzschrauben mit gewalztem oder geschmiedetem Gewinde ohne Vorbohrung sind folgende Mindestabstände einzuhalten:

Tabelle 24: Minimale Abstände bei Schraubenverbindungen mit $d_1/d \leq 0,75$

a_1/d	a_3/d	a_2/d	a_4/d
[-]	[-]	[-]	[-]
6	10	3.5	3.5

4.3 Beanspruchung in Schafrichtung

Verbindungen im Hirnholz sind ausschliesslich unter folgenden Bedingungen zulässig:

- Holzschrauben mit gewalztem oder geschmiedetem Gewinde
- Feuchtekasse 1.
- Winkel zwischen Kraft- und Faserrichtung $\alpha \geq 30^\circ$.

Der Tragwiderstand einer Schraubenverbindung bzw. einer Schraubengruppe bei Beanspruchung in Schafrichtung ist für folgende Versagensarten zu überprüfen:

- Ausziehen des Gewindeteils der Schraube
- Abreissen des Schraubenkopfs

- Durchziehen des Schraubenkopfs
- Zugversagen der Schraube
- Knicken der Schraube bei Druckbeanspruchung
- Ausscheren eines Holzteils.

Bei Beanspruchung in Schafrichtung sind die Mindestabstände gemäss Tabelle 25 einzuhalten.

Tabelle 25: Mindestabstände für in Schafrichtung beanspruchte Schrauben.

Minimaler Schraubenabstand in einer Ebene parallel zur Faserrichtung	Minimaler Schraubenabstand rechtwinklig zu einer Ebene parallel zur Faserrichtung	Minimaler Endabstand des Schwerpunkts des Gewinde- teils im betrachteten Holz	Minimaler Randabstand des Schwerpunkts des Gewinde- teils im betrachteten Holz
a_1	a_2	a_3	a_4
$7d$	$5d$	$10d$	$4d$

Die wirksame Gewindelänge l_{ef} muss mindestens $6d$ betragen.

Der Bemessungswert des Auszieh- und des Eindrückwiderstandes einer Schraubengruppe $R_{ax,d}$ beträgt :

$$R_{ax,d} = n_{tot}^{0,9} \pi d l_{ef} f_{v,\alpha,d}$$

d	Nenndurchmesser in mm
n_{tot}	Gesamtanzahl Schrauben der Schraubenverbindung
l_{ef}	wirksame Gewindelänge in mm
$f_{v,\alpha,d}$	Bemessungswert der Scherfestigkeit (für $\eta_w = 1,0$ und $\eta_t = 1,0$) unter Berücksichtigung des Winkels α zwischen Kraft- und Faserrichtung.

Für Durchmesser $6 \text{ mm} \leq d \leq 20 \text{ mm}$ und ein Verhältnis $0,6 \leq d_1/d \leq 0,75$ kann der Bemessungswert der Scherfestigkeit $f_{v,\alpha,d}$ auf Ausziehen wie folgt berechnet werden:

– für $\alpha \geq 30^\circ$:

$$f_{v,\alpha,d} = k_\alpha \cdot 7 \cdot 10^{-4} \rho_k^{1,6} d^{-0,34}$$

k_α	Hilfswert $k_\alpha = 0,62$
α	Winkel zwischen Kraft- und Faserrichtung
d	Nenndurchmesser in mm
ρ_k	charakteristischer Wert der Rohdichte in kg/m^3 .

5 Literatur

- EN 1380 (2009): Timber structures - Test methods - Load bearing nails, screws, dowels and bolts; European Committee for Standardization CEN, Bruxelles, Belgium
- EN 1382 (1999): Timber structures - Test methods - Withdrawal capacity of timber fasteners. European Committee for Standardization CEN, Bruxelles, Belgium
- EN 26891 (1991): Timber structures; joints made with mechanical fasteners; general principles for the determination of strength and deformation characteristics; European Committee for Standardization CEN, Bruxelles, Belgium
- EN 15737 (2009) Timber structures - Test methods - Torsional resistance of driving in screws; European Committee for Standardization CEN, Bruxelles, Belgium
- Hübner, Ulrich (2013): Mechanische Kenngrößen von Buchen-, Eschen- und Robinienholz für lastabtragende Bauteile, Dissertation, Technische Universität Graz, Österreich.
- L.R.J. Whale, I. Smith, The derivation of design clauses for nailed and bolted joints in Eurocode 5, in: Proc. of CIB-W18 Meeting 19, Dublin, Ireland, 1986: p. CIB-W18/19-7-6.
- A.J.M. Leijten, J. Köhler, A. Jorissen, Review of probability data for timber connections with dowel-type fasteners, in: Proc. of the CIB-W18 Meeting 37, Edinburgh, UK, 2004.

Modul 2/3, Teil C

Eingeklebte Gewindestangen

Steffen Franke, Sebastian Heubuch, Bettina Franke

Berner Fachhochschule, Institut für Holzbau, Tragwerke und Architektur

Inhaltsverzeichnis

1 Allgemeines	3
1.1 Informativ	3
1.2 Festlegungen zum Versuchsprogramm.....	4
2 Material	4
2.1 Lamellen und Brettschichtholz.....	4
2.2 Zugfestigkeit der Gewindestangen	5
2.3 Klebstoff	6
3 Vorversuche Einkleben von Gewindestangen	7
3.1 Einbringvoraussetzung/Verklebung	7
3.2 Prüfung der Einbringvoraussetzungen	8
3.3 Auswertungsschema	9
3.4 Ergebnisse der Einbringvoraussetzungen	10
4 Vorversuche zu Anschlüssen mit Einzel-Gewindestangen	12
4.1 Prüfkörper und Herstellung.....	12
4.2 Versuchsdurchführung	12
4.3 Prüfung der Ausziehparameter	14
4.4 Prüfung der Einbindelänge l_{ad}	16
4.5 Prüfung des Randabstand $a_{2,c}$	19
5 Hauptversuchsprogramm	21
5.1 Allgemeines	21
5.2 Verbindungen mit mehreren Gewindestangen, $\alpha = 0^\circ$, (Zug-Zug-Versuch)	21
5.3 Verbindungen mit mehreren Gewindestangen, $\alpha = 90^\circ$, (Zug-Druck-Versuch)	22
6 Bemessungsvorschlag	24
6.1 Bemessungsmodelle	24
6.2 Randabstände.....	24
6.3 Ausziehfestigkeiten	24
6.4 Qualitätssicherung	26
7 Zusammenfassung	27
8 Literaturverzeichnis	28
Anhang A Ergebnisse der Auszugsversuche	30
A.1 Tragfähigkeit und Ausziehfestigkeit für Einbringversuche	30
A.2 Last-Verschiebungskurven je Prüfserie	37
A.3 Versagensbilder.....	42

1 Allgemeines

1.1 Informativ

Eingeklebte Gewindestangen sind hauptsächlich für die Übertragung von Zug- bzw. Druckkräften vorgesehen. Auftretende Momente werden in eine Zug- und Druckbeanspruchung aufgeteilt und Querkräfte über die Lochleibung und dem Stahlquerschnitt abgetragen. Die Zugkräfte werden über die Klebefuge von der Gewindestange in den Holzquerschnitt eingeleitet. Je nach Anschlusstyp werden die Gewindestangen parallel, geneigt oder senkrecht zur Faser eingebracht. Die jeweiligen Achs- und Randabstände beeinflussen das Tragverhalten. Das Versagen kann durch ein Aufspalten frühzeitig eintreten, was zu einer reduzierten Tragfähigkeit führt, und sollte daher durch geeignete Massnahmen ausgeschlossen werden.

In der SIA 265:2012 ist die Anwendung von eingeklebten profilierten Stäben in Anschlüssen auf die Feuchteklasse 1 und 2 beschränkt. Zur Abschätzung der Tragfähigkeit von axial auf Zug beanspruchten eingeklebten profilierten Stäben/Gewindestangen ist lt. SIA 265:2012 das:

- Versagen des profilierten Stabes (Fliessgrenze, Ausknicken unter Druckbeanspruchung),
- Versagen des Klebstoffs und seines Verbundes mit dem profilierten Stab und dem Holz,
- Versagen des Holzes entlang der Klebefuge und
- Versagen eines Holzteils im Bereich der Verbindung

abzuschätzen. Die SIA 265:2012 fordert, dass die charakteristische Ausziehkraft an Versuchen zu bestimmen ist und beinhaltet keine Bemessungsregeln. Die folgenden Einflussgrössen sollten berücksichtigt werden:

- Lochdurchmesser d_{hole} , Stabdurchmesser d ,
- Einklebelänge l_{ad} ,
- Holzart, Festigkeitsklasse, Rohdichte, Holzfeuchte,
- Stahlgüte, Profilierung,
- Eigenschaften des Klebstoffs,
- Winkel zwischen Stab- und Faserrichtung und
- Rand- und Zwischenabstände.

In der DIN EN 1995-1-1/NA:2010 ist hingegen das folgende Bemessungskonzept enthalten, welches als Grundlage für die Versuchsplanung und spätere Bemessungsnachweise dient:

$$F_{ax,Rd} = \min \left\{ \begin{array}{ll} f_{y,d} \cdot A_{ef} & \text{Stahlversagen} \\ \pi \cdot d \cdot l_{ad} \cdot f_{k,1,d} & \text{Versagen Klebeverbund} \end{array} \right\} \quad (1)$$

mit:

$f_{y,d}$	Streckgrenze des Stahlstabes
A_{ef}	Spannungsquerschnitt Stahlstab
l_{ad}	Einklebelänge $l_{ad,min} = \max \{0.5d^2; 10d\}$
d	Nenn Durchmesser Stahlstab
$f_{k,1,d}$	Klebefugenfestigkeit

Für Anschlüsse mit eingeklebten Gewindestangen sind im Folgenden die Ergebnisse aus den Modul 2 Durchführung der Versuchsreihen und dem Modul 3 Erarbeitung von Bemessungsgrundlagen aufgeführt. Die Bearbeitung erfolgte durch die Berner Fachhochschule, des Instituts für Holzbau, Tragwerke und Architektur HTA. Die Forschungsergebnisse stützen sich weiterhin auf die Masterthesis von Sebastian Heubuch, derzeit noch in Bearbeitung. Dem Studierenden wird ganz herzlich für die Mitarbeit gedankt.

- Sebastian Heubuch (2019) Bewertung der Tragfähigkeit von eingeklebten Gewindestangen in Laubholz, Master Thesis, Berner Fachhochschule, Architektur, Holz und Bau, Biel/Bienne

1.2 Festlegungen zum Versuchsprogramm

Das Versuchsprogramm gliedert sich in Vorversuchsserien und Hauptversuchsserien mit praxisrelevanten Geometrien im Anschluss und Kräften in der Lastübertragungen. Die Planung der Hauptversuchsserien basiert auf den Ergebnissen aus den Vorversuchsreihen. In den experimentellen Untersuchungen sind Anschlüsse mit einer Beanspruchung parallel zur Faser und senkrecht zur Faser unterschieden.

Die Resultate der Vorversuche dienen der Bewertung der unterschiedlichen Einflussparameter, im speziellen dem Verhindern des Aufspaltens. Da das Versagen der eingeklebten Gewindestangen ein sprödes Verhalten aufweist, wird und muss in der praktischen Dimensionierung und Umsetzung das Versagen der Verbindung auf eine Stahlversagen der Gewindestangen ausgelegt werden, wodurch eine Duktilität erreicht wird.

Neben den Versuchen an den Verbindungen wird die Stahlgüte und Festigkeit der Gewindestangen durch Zugversuche bestimmt. Zum Vergleich mit Berechnungsansätzen wird die Bemessung nach DIN EN 1995-1-1/NA:2010 verwendet.

Die Vorversuche dienen der Untersuchung und Festlegung folgender Parameter:

- Einbringvoraussetzungen für eingeklebte Gewindestangen sowie der Eignung des Klebstoffes
- Minimale und optimale Abstände zwischen Verbindungsmitteln: $a_{z,c}$
- Minimale und optimale Abstände zum Rand: a_l
- Ausziehparameter (sofern nicht vorhanden) für Gewindestangen als Werte für die Planung der Hauptversuche und Bemessungsmethoden

Die Hauptversuche dienen der weiteren Evaluierung der Bemessungsansätze und berücksichtigen folgende Variationen:

- Parallel und senkrecht zur Faser beanspruchte Versuchsreihen
- Variation der Anzahl der Gewindestangen
- Prüfung der zurückversetzten Einbindelänge

Generell sieht das Versuchsprogramm notwendige Versuche vor, um die oben genannten Parameter bestimmen zu können. Das Programm ist daher umfassend aufgestellt und wurde unter Beachtung bereits erreichter Ergebnisse dynamisch angepasst und gekürzt.

2 Material

2.1 Lamellen und Brettschichtholz

Die Lamellen zur Herstellung der Brettschichtholzträger stammen von der Fa. A+C Corbat SA. Das Brettschichtholz für die Prüfkörper parallel zur Faserrichtung wurde bei der Fa. Roth AG verklebt und direkt auf Mass zugeschnitten. Die Herstellung erfolgte jeweils nach den Anforderungen der SN EN 14080:2013. Es wurden keine Keilzinkenverbindungen ausgeführt. Zur Herstellung wurde Melamin-Harnstoff-Formaldehyd (MUF) respektive Polyurethan Klebstoff eingesetzt. Die Versuchskörper für alle anderen Prüfserien wurden aus den von der neuen Holzbau AG gelieferten BSH-Trägern im Technologiepark der Berner Fachhochschule (BFH) zu geschnitten.

Die Herstellung der Versuchskörper zu Anschlüssen mit Gewindestangen erfolgt vorrangig im Technologiepark der Berner Fachhochschule (BFH). Die Versuchskörper der grösseren Verbindungen wurden direkt bei der Roth Burgdorf AG vorgefertigt (Zuschnitte und Bohrungen für die einzuklebenden Gewindestangen). Das Einkleben der Gewindestangen wurde stets im Technologiepark der Berner Fachhochschule mit Einweisung und Unterstützung durch Henkel & Cie AG durchgeführt.

Die Rohdichten der eingeschnittenen Lamellen wurden stichprobenartig bei der Roth Burgdorf AG ermittelt. Dabei wurden bei etwa 10 % der Lamellen die Rohdichten bestimmt. Der Mittelwert liegt bei $\rho = 710 \text{ kg/m}^3$ mit einem Variationskoeffizienten von 5.1 %. Der minimal gemessene Wert lag bei $\rho = 638 \text{ kg/m}^3$ und der Maximalwert bei $\rho = 792 \text{ kg/m}^3$. Die Verteilung der Häufigkeit der Rohdichte der Lamellen ist in Abb. 1 dargestellt.

Alle Prüfkörper wurden bis zur Prüfung im Normalklima 20°C und 65% rel. Luftfeuchte klimatisiert und die mittlere Holzfeuchte, bestimmt durch Darrproben nach Versuchsdurchführung, betrug 9.5 M% mit einem Variationskoeffizient von 10.4 M%.

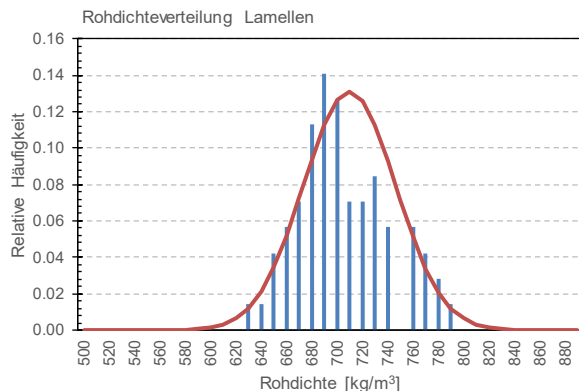


Abb. 1: Rohdichteverteilung der bei der Roth Burdorf AG eingesetzten Lamellen

2.2 Zugfestigkeit der Gewindestangen

Die zum Einkleben verwendeten Gewindestangen entsprechen der Festigkeitsklasse 8.8 und 10.9. Die Festigkeitsklassen wurden in Zugversuchen in Anlehnung an SN EN ISO 6892-1:2010 geprüft. Die Gewindestangen wurden durch eine Einhängevorrichtung über Muttern in der Prüfmaschine belastet. Die Prüfgeschwindigkeit bis zum Versagen betrug 3 mm/min. Die Versuche wurden bis zum Bruch belastet. Der Prüfaufbau ist in Abb. 2 dargestellt. In Abb. 4 sind die Belastungskurven exemplarisch gezeigt und in Tab. 1 die Stahlzugfestigkeiten als Mittelwert und charakteristischer Wert gegenübergestellt. Die Bestimmung des charakteristischen Wertes erfolgte in Anlehnung an SN EN 14358:2016.

Die Zugfestigkeit für Gewindestangen der Festigkeitsklasse 8.8 liegt bei 800 MPa und wurde mit den geprüften Gewindestangen erreicht bzw. überschritten, siehe Tab. 1. Da in den nachfolgend dargelegten Gewindestangenausziehversuchen Stahlversagen auftrat, wurden diese Traglasten den aus den Stahlzugversuchen in Abb. 3 gegenübergestellt. Die Werte der Stahlzugversuche liegen geringfügig über denen der Auszugsversuche mit Stahlversagen, wobei drei der Werte als Ausreiser deklariert wurden. Für M12 ergibt sich gegenüber M16 und M20 eine geringere Stahlzugfestigkeit.

Tab. 1: Stahlfestigkeiten der verwendeten Gewindestangen

Gewindestange Ø [mm]	Prüfungen n [-]	$F_{u,mean}$ [kN]	$f_{u,mean}$ [MPa]	$f_{u,k}$ [MPa]	COV [%]
M12, Festigkeitsklasse 8.8	3	70,8	841	801	1,5
M16, Festigkeitsklasse 8.8	5	144,5	922	891	1,4
M20, Festigkeitsklasse 8.8	4	222,9	910	863	1,9

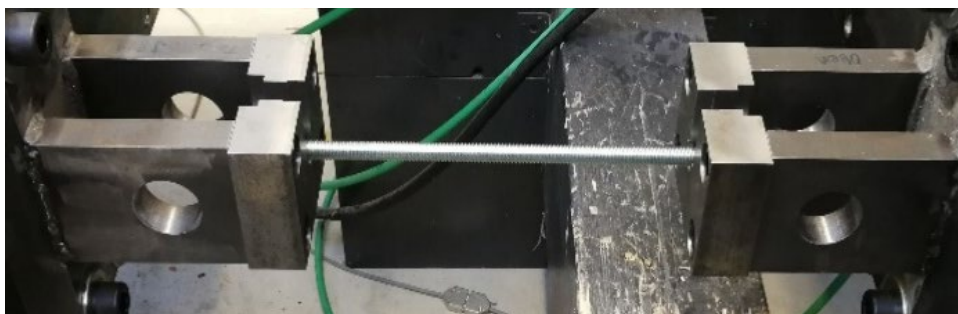


Abb. 2: Prüfanordnung für den Stahlzugversuch der Gewindestangen

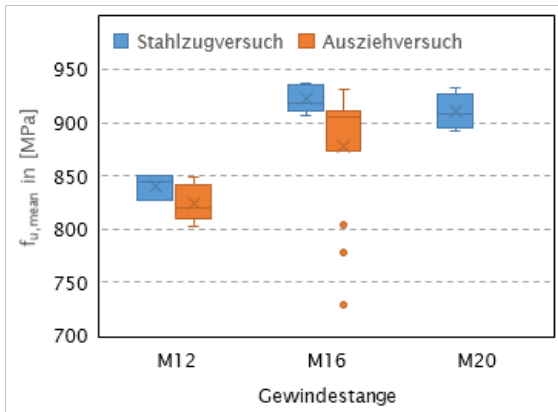


Abb. 3: Stahlfestigkeiten aus Stahlzug- und Gewindestangenauszugsversuchen

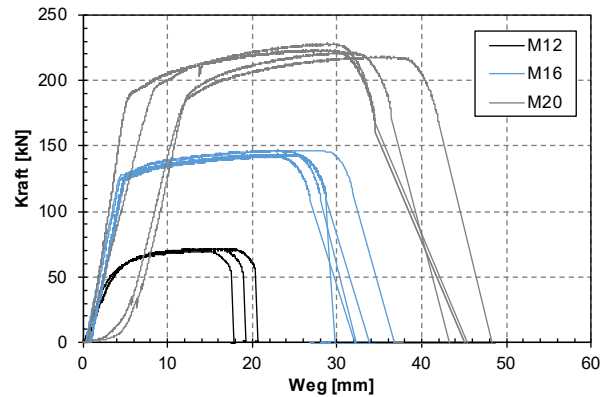


Abb. 4: Belastungskurven der Gewindestangen

2.3 Klebstoff

Als Klebstoff zum Einkleben der Gewindestangen wurde zu Beginn der Loctite® CR421 Purbond 2-Komponenten PUR Klebstoff der Firma Henkel und Cie. AG eingesetzt. Für das Hauptversuchsprogramm wurden der Loctite® CR821 als Nachfolgeprodukt eingesetzt. Dieses Produkt ist eine Weiterentwicklung und wird den Loctite® CR421 auf dem Markt ablösen. Für die Evaluierung mit dem Vorversuchsprogramm wurde mit dem neueren Klebstoff CR821 ebenfalls eine Grundserie wiederholend ausgeführt.

Die Anwendung und Applizierung erfolgte unter fachkundiger Anleitung und Unterstützung durch Mitarbeitende der Firma Henkel & Cie. AG, Sempach Station, Schweiz.

3 Vorversuche Einkleben von Gewindestangen

3.1 Einbringvoraussetzung/Verklebung

Als Vorstudie zur Bestimmung des Vorbohrdurchmessers beziehungsweise der Stärke der Klebefuge wurden zwei Prüfserien mit unterschiedlichen Bohrlochdurchmessern getestet. Diese waren $D = d + 2$ mm (Serie 1) und $D = d + 4$ mm (Serie 2). Das Prüfprogramm wurde auf eine Einklebelänge von $10d$ angepasst, da in einer ersten Prüfserie mit einer Einklebelänge von $20d$ stets Stahlversagen eingetreten ist. Der Randabstand $a_{z,c}$ ist für das Programm konstant auf $2.5d$ gesetzt. Das vollständige Prüfprogramm ist in Tab. 2 zusammengefasst.

Die Gewindestangen wurden für die Prüfserien 1, 2 und 1-, 2-neu von beiden Seiten liegend in Prüfkörper mit einem Querschnitt von $b/h = 80/80$ mm und einer Länge von 940 mm eingeklebt. Für die Zentrierung der Gewindestange im Bohrloch, zum Erreichen einer gleichmässig starken Klebefuge, wurden am Ende der Stangen Gewindegenschutzhüllen mit dem Aussendurchmesser des Bohrlochs aufgedreht. An der Bohrlochöffnung wurden die Gewindestangen mittels kleinen Holzkeilen zentriert und zum Abdichten ein Butylkautschukdichtband um die Gewindestange gewickelt, um das Austreten des Klebstoffes zu verhindern, Abb. 5 bis Abb. 8. Für das Verkleben wurde am unteren Bohrlochende ein Einfüllloch ($d = 8$ mm) und am oberen Ende ein Entlüftungsloch ($d = 8$ mm) für die Injektion des Klebstoffs gebohrt. Das Bohrloch wurde anschliessend ausgeblasen, die Gewindestange eingebracht, zentriert und der Klebstoff mittels einer Luftdruck-Applikationspistole eingepresst. Die Ein- und Austrittslöcher wurden danach mit herkömmlichen Buchendübel ($d = 8$ mm) verschlossen. Nach 10 Tagen Aushärtezeit wurden die Prüfkörper getestet.



Abb. 5: Liegende Verklebung der Prüfkörper



Abb. 6: Gewindegenschutzhüllen für Gewindestangen M20, M16 und M12



Abb. 8: Einklebte Gewindestange abgedichtet mit Butylkautschukband und zentriert mit Holzkeilen

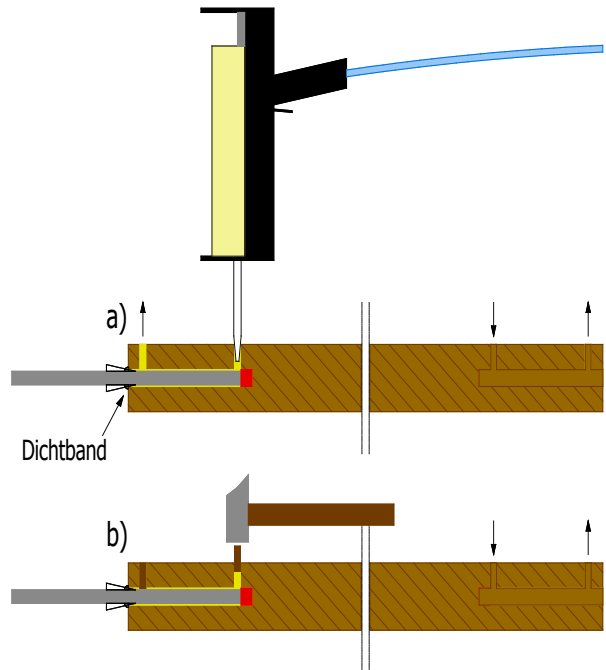


Abb. 7: Einkleben der Gewindestangen a) Klebstoffinjektion, b) Verschliessen der Injektionslöcher

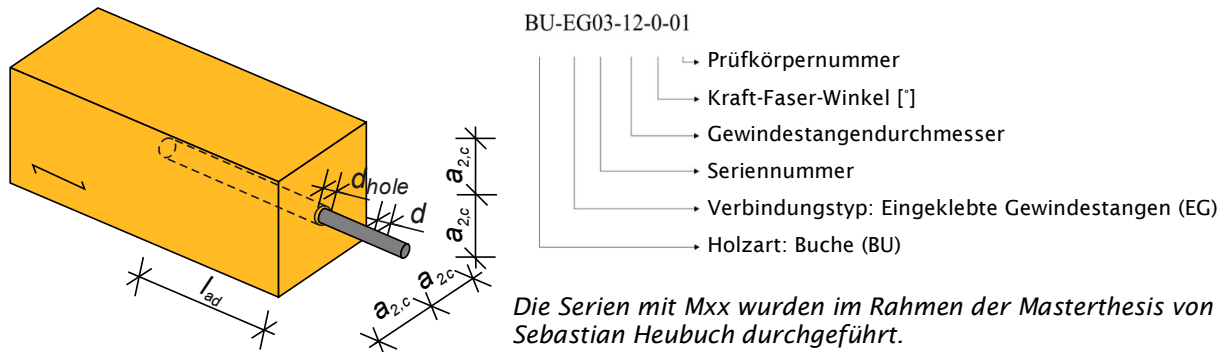


Abb. 9: Prinzipskizze mit Variablendeklaration und Legende zu Prüfseriennamen

Tab. 2: Serien zur Bestimmung des Vorbohrdurchmessers

Nr.	Klebstofftyp	Nenndurchmesser d [mm]	Bohrlochdurchmesser d_{hole} [mm]	Einbindelänge l_{ad}	Anzahl VM	Querschnitt $b/h/l$ [mm]	Anzahl Versuche
1	Loctite® CR421	16	16+2	$20d$	1	80/80/940	5
2	Loctite® CR421	16	16+4	$20d$	1	80/80/940	5
1_neu	Loctite® CR421	16	16+2	$10d$	1	80/80/620	5
2_neu	Loctite® CR421	16	16+4	$10d$	1	80/80/620	5
M09	Loctite® CR821	16	16+2	$10d$	1	80/80/620	5
M10	Loctite® CR821	16	16+4	$10d$	1	80/80/620	5

Die Gewindestangen in den Prüfserien M09 und M10 wurden stehend in den Prüfkörper eingeklebt, siehe 4.1. Diese Prüfserien wurden aufgrund der Weiterentwicklungen vom Projektpartner Henkel & Cie AG und der Einführung des neuen Klebstoff Loctite® CR821 während des Forschungsvorhaben zeitlich später als Referenz durchgeführt. Die geplanten/durchgeführten Versuchsserien sind fortlaufend nummeriert und in der Bezeichnung des Prüfkörpers neben weiteren Parametern, vgl. Abb. 9 und Tab. 2.

3.2 Prüfung der Einbringvoraussetzungen

Die Prüfung erfolgte mittels Zug-Zug-Versuch in einem liegenden Zugprüfrahmen (siehe Abb. 10). Die Krafteinleitung in die Gewindestange erfolgt über eine aufgedrehte zweiteilige Mutter mit Kalotte. Als Widerlager wurde eine spezielle Aufnahmevorrichtung zum Einhängen der Prüfkörper verwendet (siehe Abb. 10). Die Muttern wurden handfest angezogen. Die Versuchskörper werden nach SN EN 26891:1991 stufenweise zunächst kraftgesteuert innerhalb von zwei Minuten auf 40% ihrer Bruchlast belastet, anschliessend auf 10 % entlastet und auf 70 % der Bruchlast erneut mit gleicher Geschwindigkeit belastet, siehe Abb. 11 und Abb. 12. Anschliessend werden die Versuchskörper mit 1 mm/min weggesteuert zum Bruch gefahren.

Innerhalb des Versuches wurde die Last-Lastpunkt-Verschiebungskurve über vier am Prüfkörper applizierten induktiven Wegaufnehmern (LVDT) parallel zum Maschinenweg erfasst. Um mögliche Beschädigungen an den LVDTs beim Versagen des Prüfkörpers zu vermeiden, wurde das Testprogramm bei 70 % der zu erwartenden Bruchlast angehalten, die LVDTs abgenommen und anschliessend die Prüfung bis zum Bruch fortgesetzt.



Abb. 10: Eingespannter Prüfkörper als Zug-Zug-Versuch

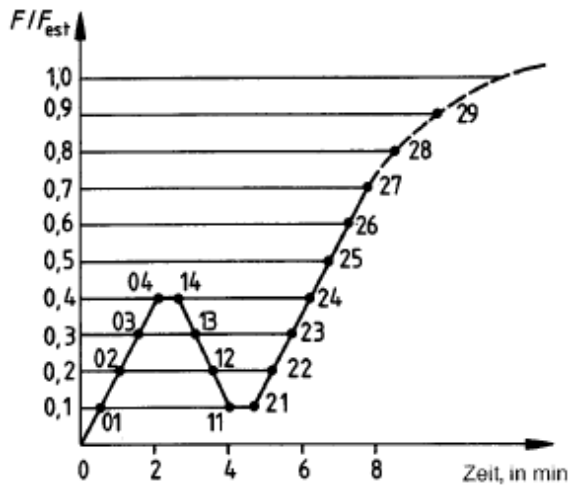


Abb. 11: Belastungsverfahren nach EN 26891:1991

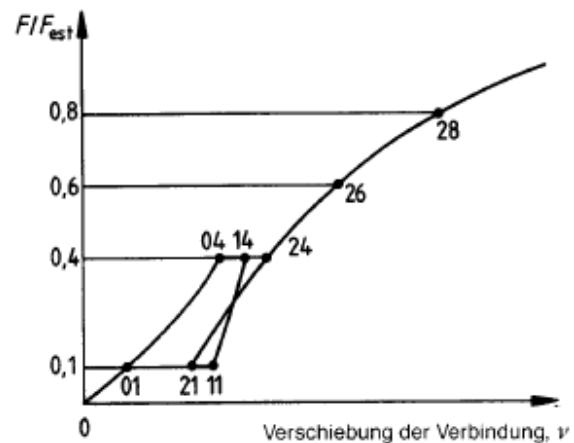


Abb. 12: Auswertungen anhand der Last-Verschiebungskurve nach EN 26891:1991

3.3 Auswertungsschema

Anhand der bei den Versuchen erhaltenen Last-Verformungskurven werden die Steifigkeiten sowie die Tragfähigkeit der Verbindungen ermittelt. Das im Folgenden aufgeführte Auswertungsschema zeigt exemplarisch die ausgewerteten Lasten und Steifigkeiten der Verbindungen. Für die Bestimmung der Steifigkeiten wurden direkt die Verformungen zw. Gewindestange und Holzoberfläche gemessen. Bei der Bestimmung der Last in Abhängigkeit der Verformung wird bei den symmetrischen Anschlüssen von gleichen Verformungen in den Verbindungen ausgegangen und die Verformungsgrenze somit verdoppelt (vgl. «Last bei 5 mm Verformung» und « F_{5mm} » in Abb. 13).

- Last bei 2 mm plastische Verformung $F_{2mm,pl.Verf.}$, (offset-method)
- Fließgrenze nach SIA 265:2012, F_y, w_y
- Last bei 5 mm Verformung F_{5mm} (entspricht 10 mm Maschinenweg bei beidseitigem Anschluss)
- Höchstlast F_{max}
- Bruchlast F_u als 80 % der Höchstlast und Bruchverformung w_u für Berechnung der Duktilität, nach SIA 265:2012

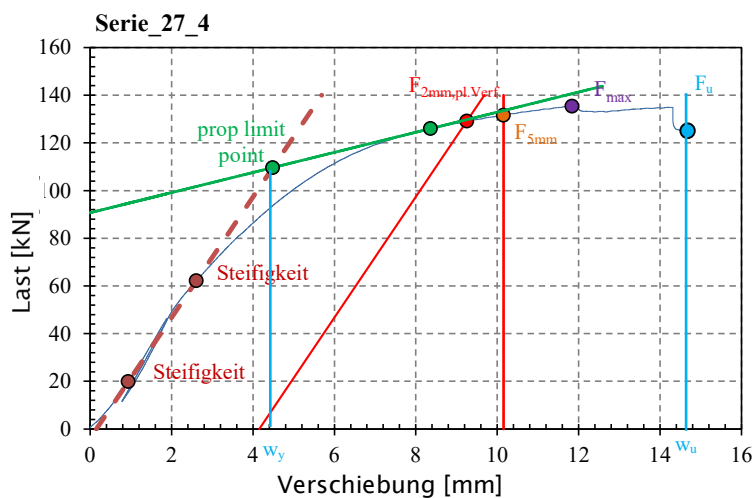


Abb. 13: Auswertungsschema der Tragfähigkeit eines beidseitigen Anschlusses

3.4 Ergebnisse der Einbringvoraussetzungen

Die Versuche werden nach dem Auswertungsschema im Abschnitt 3.3 anhand der maximalen Tragfähigkeit ausgewertet. In den folgenden Grafiken sind jeweils die Lastverschiebungsdiagramme, die gemittelten Lastverschiebungskurven und die Ausziehfestigkeiten bezogen auf den Nenndurchmesser angegeben. Detaillierte Angaben zu den Kenngrössen und erreichten Tragfähigkeiten sind dem Anhang A zu allen Versuchsserien zu entnehmen.

Die Bruchlasten bei einem Bohrlochdurchmesser von $d_{hole} = d + 2 \text{ mm} = 18 \text{ mm}$ ($F_{Bruch,mean} = 112.0 \text{ kN}$) sind im Mittel um ca. 20 kN niedriger als bei einer Vorbohrung mit $d = 20 \text{ mm}$ ($F_{Bruch,mean} = 132.8 \text{ kN}$). Somit sind auch mit grösserem Bohrlochdurchmesser die auf die Mantelfläche der Gewindestange bezogenen Ausziehfestigkeiten höher. Im Versagen der Prüfserien 01_neu und M10 wurde ein Schubversagen des Holzes an der Mantelfläche der Klebefuge und bei 02_neu und M09 ein Klebefugenversagen festgestellt. Des Weiteren ist im Vergleich der Last-Verformungsdiagramme der Serien 1_neu und 2_neu (siehe Abb. 14 und Abb. 15) zu beobachten, dass die Gewindestange bei grösserem Bohrlochdurchmesser und einer daraus resultierenden stärkeren Klebefuge tendiert zu fließen und höhere Duktilität aufweist.

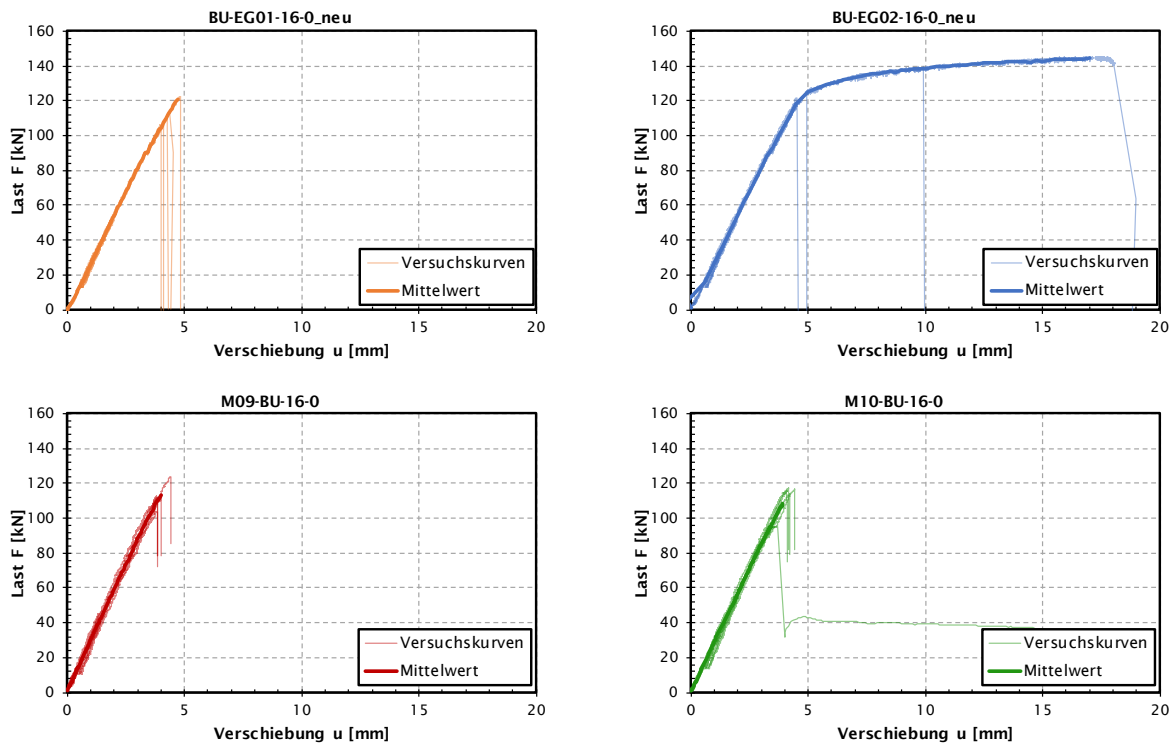


Abb. 14: Einzelne Last-Verformungskurven der Versuchsserien

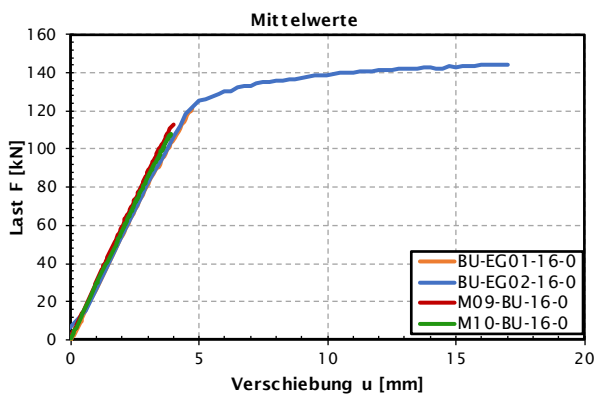


Abb. 15: Gemittelte Last-Verformungskurven der Versuchsserien



Abb. 16: Schubversagen des Holzes bei kleinem Bohrlochdurchmesser Serie EG01_neu



Abb. 17: Klebefugenversagen bei grossem Bohrlochdurchmesser Serie EG02_neu



Abb. 18: Ausziehen bei Bohrdurchmesser $d+2$ mm in Serie M09



Abb. 19: Ausziehen bei Bohrdurchmesser $d+4$ mm in Serie M10

Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Aufgrund des duktilen Verhaltens wurde für die weiteren Versuchsreihen ein Bohrlochdurchmesser von $d_{hole} = d + 4$ mm gewählt, vgl. Abb. 15. Im Zuge von Diskussionen im Projektzeitraum bzgl. dieses Verhaltens und im Hinblick auf den Klebstoffbedarf und die Sicherheit im Tragfähigkeitsnachweis wird für die Anwendung dennoch ein Bohrlochdurchmesser von $d_{hole} = d + 2$ mm für die Praxis empfohlen. Die Ausziehfestigkeiten unterscheiden sich geringfügig für die verschiedenen Bohrdurchmesser d_{hole} und den Klebstofftyp, siehe Abb. 20.

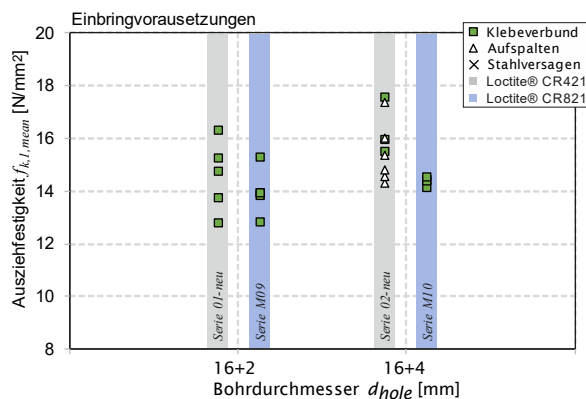


Abb. 20: Ausziehfestigkeit in Abhängigkeit des Bohrdurchmessers d_{hole} und Klebstofftyps für parallel zur Faser eingeklebte und beanspruchte Stahlstäbe

4 Vorversuche zu Anschlüssen mit Einzel-Gewindestangen

4.1 Prüfkörper und Herstellung

Die Prüfkörper für die parallel zur Faserrichtung eingeklebten Gewindestangen wurden vom Industriepartner Firma Roth AG bereits auf Mass zugeschnitten und vorgebohrt. Die weiteren Prüfkörper für einen Kraftfaserwinkel von 45° und 90° wurden im Technologiepark an der Berner Fachhochschule aus Brettschichtholzträgern vom selben Industriepartner herausgeschnitten. Die Bohrlöcher wurden mithilfe einer Langlochbohrmaschine zentrisch vor- und dann auf die richtige Tiefe händisch weitergebohrt. Die Verklebung der Stahlstangen wurde im Gegensatz zu Serien 1 und 2 stehend durchgeführt. Hierdurch wurde nur ein Eintrittsloch für den Klebstoff am unteren Ende des Gewindestangenlochs benötigt, s. Abb. 23. Für das Einkleben der Gewindestange wurde das Bohrloch ausgeblasen, die Gewindestange mit Schutzkappen für die Zentrierung eingebracht und anschliessend der Klebstoff mittels einer Luftdruck-Applikationspistole eingepresst. Die Eintrittslöcher wurden danach mit herkömmlichen Buchendübeln ($d = 8 \text{ mm}$) verschlossen.

4.2 Versuchsdurchführung

Die Versuche wurden nach zwei verschiedenen Methoden durchgeführt. Die parallel zur Faserrichtung eingeklebten Stahlstäbe wurden in einer liegenden Zugprüfmaschine als Zug-Zug-Versuch durchgeführt, siehe Abb. 24. Die Prüfkörper wurden hierzu symmetrisch aufgebaut und beidseitig eine Gewindestange eingeklebt. Die senkrecht (90°) bzw. schräg (45°) zur Faser eingeklebten Gewindestangen wurden in einer Universal-Prüfmaschine getestet, siehe Abb. 25. Die Gewindestange wurde hierzu einseitig eingeklebt und mittels Zug-Druck-Versuchsaufbau bis zum vollständigen Versagen geprüft. Die Prüfkörper wurde über einer Stahlplatte, mit einer mittigen Öffnung (Öffnungsdurchmesser = $3d$, mit d = Gewindestangendurchmesser) für die Gewindestange und vier Stahlstangen am Prüfmaschinentisch zurückgehalten. Die eingeklebte Gewindestange wurde am Prüfstempel mit einer speziellen gelenkigen Lagerung eingespannt und bis zum Bruch belastet.

Innerhalb des Versuches wurde die Last-Lastpunkt-Verschiebungskurve über vier respektive zwei am Prüfkörper applizierten induktiven Wegaufnehmern (LVDT) parallel zum Maschinenweg erfasst. Zur Vermeidung von Beschädigungen an den LVDTs beim Versagen des Prüfkörpers, wurde das Testprogramm bei 70 % der zu erwartenden Bruchlast angehalten, die LVDTs abgenommen und anschliessend die Prüfung bis zum Bruch fortgesetzt.

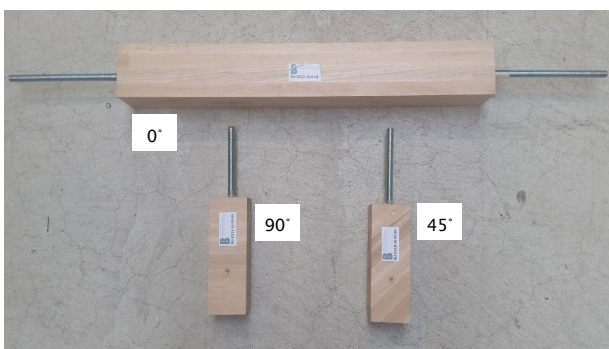


Abb. 21: Prüfkörper mit unter 0° , 45° und 90° zur Faser eingeklebten Gewindestangen

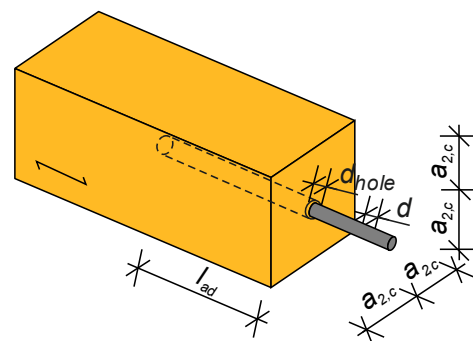


Abb. 22: Prinzipskizze mit Variablendeclaration

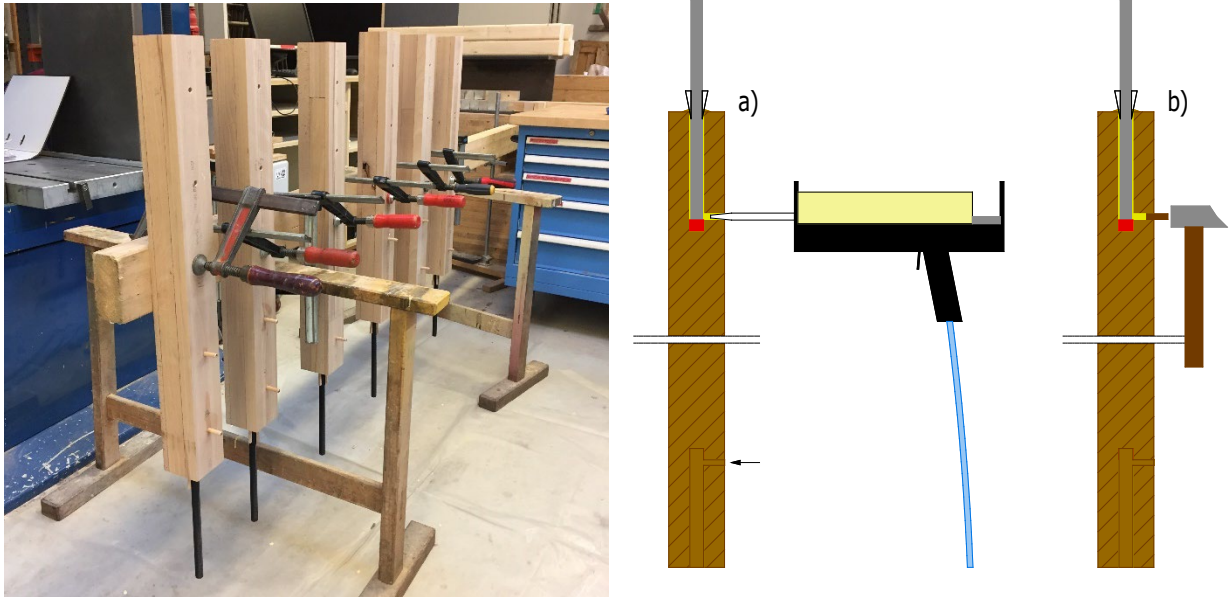


Abb. 23: Aufrechtes Einkleben der Gewindestangen, praktische Ausführung (links) und prinzipiell (rechts)



Abb. 24: Eingespannter Prüfkörper als Zug-Zug-Versuch



Abb. 25: Zug-Druck-Versuchsvorrichtung

4.3 Prüfung der Ausziehparameter

4.3.1 Prüfserie zur Ausziehfestigkeit in Abhängigkeit des Durchmessers und Lastwinkels

Zur Bestimmung der Ausziehparameter wurden Versuche mit Einzel-Gewindestangen durchgeführt. Das Versuchsprogramm besteht aus Verbindungen mit parallel, unter 45° und rechtwinklig zur Faserrichtung eingeklebten und axial belasteten Gewindestangen, siehe Abb. 21. Tab. 3 zeigt die Serien des Vorversuchsprogramms als Übersicht. Die Serie 2_neu aus der Serie zur Bestimmung des optimalen Vorbohrdurchmessers bildet dabei die Referenz zum Vergleich der Serien und Abhängigkeiten untereinander.

Tab. 3: Serien zur Bestimmung der Ausziehfestigkeit einzelner Stangen mit konstanter Einbindelänge $10d$

Nr.	α	Nenndurch- messer d [mm]	Bohrdurch- messer d_{hole} [mm]	Randab- stand $a_{2,c}$ [mm]	Einbindelänge l_{ad}	Anzahl VM	Querschnitt $b/h/l$ [mm]	Anzahl Versuche
3	0°	12	12+4	$2.5d$	10d/120 mm	1	60/60/540	5
2_neu	0°	16	16+4	$2.5d$	10d/160 mm	1	80/80/620	5
M10	0°	16	16+4	$2.5d$	10d/160 mm	1	80/80/620	5
16	0°	20	20+4	$2.5d$	10d/200 mm	1	100/100/700	5
5	90°	12	12+4	$2.5d$	10d/120 mm	1	60/180/180	5
13	90°	16	16+4	$2.5d$	10d/160 mm	1	80/235/240	5
18	90°	20	20+4	$2.5d$	10d/200 mm	1	100/285/300	5
10	45°	16	16+4	$2.5d$	10d/160 mm	1	80/160/240	5

Die Versuche werden nach dem Auswertungsschema im Abschnitt 3.3 anhand der maximalen Tragfähigkeit ausgewertet. In den folgenden Grafiken sind jeweils die Einzelwerte der maximalen Ausziehfestigkeit der 5 Versuchskörper angegeben. Detaillierte Angaben zu den erreichten Ausziehfestigkeiten sind dem Anhang A zu allen Versuchsserien zu entnehmen. In den zusammenfassenden Diagrammen sind die Maximallasten sowie die auf die Mantelfläche der Gewindestange bezogenen Ausziehfestigkeiten dargestellt. Die Mantelfläche ist mit dem Nenndurchmesser der Gewindestange berechnet.

Parallel zur Faserrichtung 0°

Die Ausziehfestigkeiten von parallel zur Faserrichtung eingeklebten Gewindestangen mit konstanter Einbindelänge l_{ad} und Randabstand $a_{2,c} = 2.5d$ wurde mit drei verschiedenen Gewindestangendurchmessern (M12, M16, M20) untersucht. Die Traglastkurven je Prüfserie sowie der Vergleich der gemittelten Kurven ist in Abb. 26 enthalten. Im Versagen der Prüfserien konnte ein Schubversagen des Holzes im Bereich der Klebefuge, ein Aufspalten des Holzes respektive Stahlversagen festgestellt werden, welches dann in der Charakterisierung der Ausziehfestigkeit individuell berücksichtigt ist.

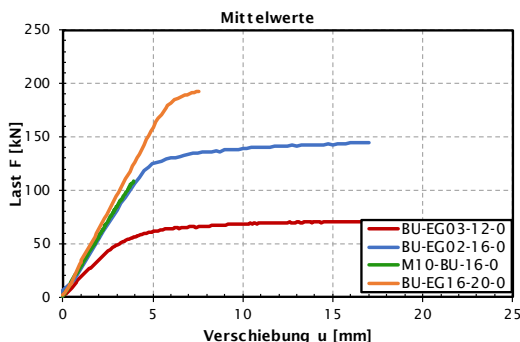


Abb. 26: Einzelne und gemittelte Last-Verformungskurven der Versuchsserien, Versagensfall, Aufspalten des Holzes

Senkrecht zur Faserrichtung 90°

Die Ausziehfestigkeiten von senkrecht zur Faserrichtung eingeklebten Gewindestangen mit konstanter Einbindelänge l_{ad} und Randabstand $a_{2,c} = 2.5d$ wurden für verschiedene Gewindestangendurchmesser untersucht. Die Traglastkurven je Prüfserie sowie der Vergleich der gemittelten

Kurven sind in Abb. 27 enthalten. Die Prüferserien zeigten im Versagen ein Kohäsionsversagen der Klebefuge, ein Verbundversagen zwischen Klebstoff und Holz und ein Holzversagen auf Querszug oder zum Teil Stahlversagen. Die spezifischen Versagensarten sind in der Ermittlung der Festigkeiten berücksichtigt.

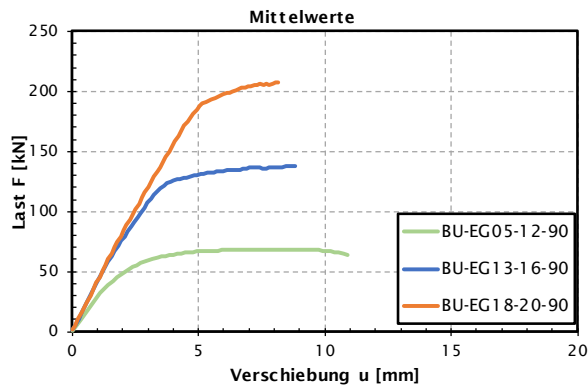


Abb. 27: Einzelne und gemittelte Last-Verschiebungskurven der Versuchsserien



Abb. 28: Querszugversagen im Holz und Versagen des Verbundes Holz-Klebstoff, Serie 18

Lastwinkel von 45° zur Faserrichtung

Die Ausziehfestigkeiten für 45° zur Faserrichtung wurde für eine eingeklebte Gewindestange mit Einbindelänge l_{ad} von $10d$ und Gewindestangendurchmesser (M16) und Randabstand $a_{2,c} = 2,5d$ untersucht. Die Traglastkurve ist in Abb. 29 enthalten. In der Versuchsserie wurde Kohäsionsversagen der Klebefuge festgestellt.

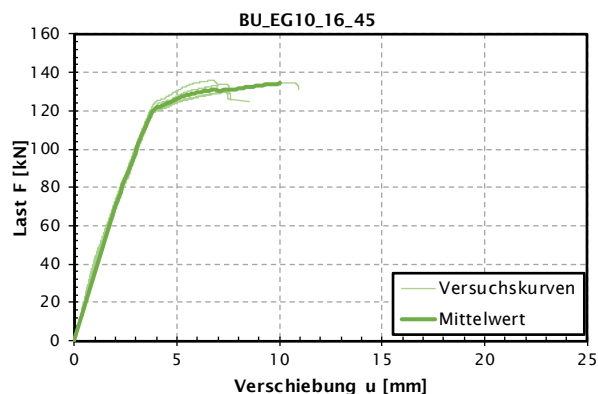


Abb. 29: Einzelne und gemittelte Last-Verschiebungskurven der Versuchsserien



Abb. 30: Kohäsionsversagen der Klebefuge, Serie 10

Vergleich der Festigkeiten

In Abb. 31 ist ersichtlich, dass die Ausziehfestigkeit für Gewindestangen parallel zur Faserrichtung eingeklebt und beansprucht im grösseren Mittel auf gleichem Niveau ist. Allerdings nehmen die Streuungen mit grösseren Durchmessern zu. Für senkrecht zur Faserrichtung eingeklebte Gewindestangen wird bei M12 bereits bei $l_{ad} = 10d$ die Stahlzugfestigkeit für Gewindestangen 8.8 überschritten, womit keine Ausziehfestigkeit für M12 bestimmt werden kann. Für Gewindestangen mit M16 und M20 tritt ein Versagen des Klebeverbundes auf und die Ausziehfestigkeiten erreichen höhere Werte verglichen zu parallel orientierten und belasteten Gewindestangen. Für unter 45° zur Lasttrichtung eingeklebten Gewindestangen tritt auch ein Klebeverbundversagen für Einbindelängen von $l_{ad} = 10d$ ein. Ein Einkleben der Gewindestangen im Winkel von 45° zur Faser ergibt ebenfalls eine höhere Ausziehfestigkeit im Vergleich zu parallel eingeklebten Gewindestangen.

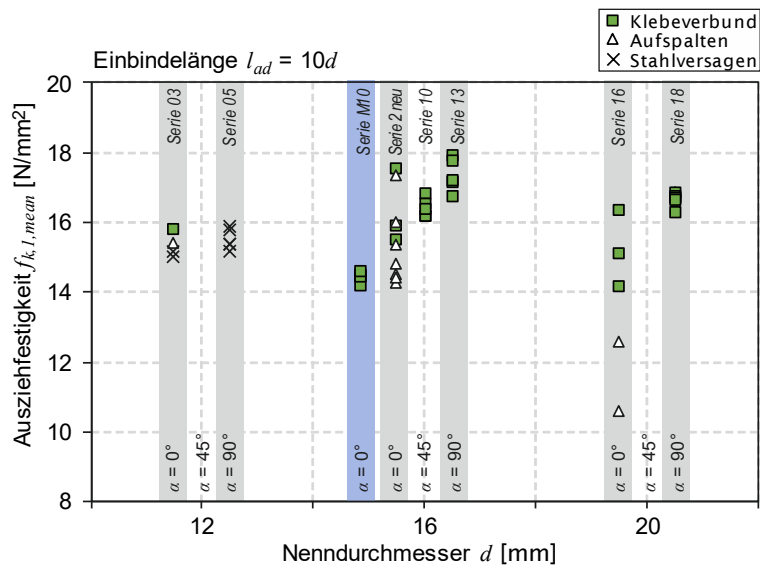


Abb. 31: Ausziehfestigkeiten in Abhängigkeit des Nenndurchmessers d und Lastwinkels α

4.4 Prüfung der Einbindelänge l_{ad}

Zur Prüfung der Einbindelänge wurden Prüfserien mit parallel, senkrecht und unter 45° zur Faserichtung eingeklebt und in Stabachse beanspruchte Stahlstäbe untersucht. In Abhängigkeit des Lastwinkels sind Einbindelängen von $8d$, $10d$, $15d$ und $20d$ berücksichtigt. Wobei für einen Lastwinkel von 0° zusätzlich zur Variation der Einbindelänge auch Untersuchungen zur reduzierten resp. zurück versetzten Einbindelänge durchgeführt wurden, vgl. Tab. 4. In Serie 7 wurde die Einklebelänge zurückversetzt respektive ein Vorholz von $2d$ berücksichtigt, in dem das Gewinde der Stange bis zum Kerndurchmesser abgedreht wurde. Hierdurch wurde gewährleistet, dass der einzuklebende Teil der Gewindestange eine Länge von $10d = 160$ mm beträgt. In den Serien M13 und M15 wurde ein Vorholz von $5d$ berücksichtigt in dem ein zusätzliches Austrittsloch für den Klebstoff bei senkrechter Verklebung mit entsprechendem Abstand von der Stirnseite vorgesehen wurde.

Tab. 4: Serien zur Beurteilung der Einbindelänge, einzelner Stangen

Nr.	α	Nenndurch- messer d [mm]	Bohrdurch- messer d_{hole} [mm]	Randab- stand $a_{z,c}$ [mm]	Einbindelänge l_{ad}	Anzahl VM	Querschnitt $b/h/l$ [mm]	Anzahl Versuche
3	0°	12	12+4	$2.5d$	$10d/120$ mm	1	60/60/540	5
44	0°	16	16+4	$2.5d$	$8d/128$ mm	1	80/80/556	5
2_neu	0°	16	16+4	$2.5d$	$10d/160$ mm	1	80/80/620	5
M10 ¹⁾	0°	16	16+4	$2.5d$	$10d/160$ mm	1	80/80/620	5
4	0°	12	12+4	$2.5d$	$15d/180$ mm	1	60/60/660	5
8	0°	16	16+4	$2.5d$	$15d/240$ mm	1	80/80/780	5
1	0°	16	16+4	$2.5d$	$20d/320$ mm	1	80/80/940	5
7	0°	16	16+4	$2.5d$	$10d+2d/160+32$ mm	1	80/80/620	5
M13 ¹⁾	0°	16	16+2	$2.5d$	$10d+5d/160+80$ mm	1	80/80/780	5
M15 ²⁾	0°	16	16+2	$2.5d$	$10d+5d/160+80$ mm	1	80/80/780	5
16	0°	20	20+4	$2.5d$	$10d/200$ mm	1	100/100/700	5
5	90°	12	12+4	$2.5d$	$10d/120$ mm	1	60/180/180	5
13	90°	16	16+4	$2.5d$	$10d/160$ mm	1	80/235/240	5
18	90°	20	20+4	$2.5d$	$10d/200$ mm	1	100/285/300	5
6	90°	12	12+4	$2.5d$	$15d/180$ mm	1	60/180/270	5
14	90°	16	16+4	$2.5d$	$15d/240$ mm	1	80/240/360	5
10	45°	16	16+4	$2.5d$	$10d/240$ mm	1	80/160/240	5
11	45°	16	16+4	$2.5d$	$15d/240$ mm	1	80/165/360	5

¹⁾ Loctite® CR821

²⁾ Loctite® CR421

Die Versuche werden nach dem Auswertungsschema im Abschnitt 3.3 anhand der maximalen Tragfähigkeit ausgewertet. In den folgenden Grafiken sind jeweils die Lastverschiebungskurven der einzelnen Serien und der Vergleich der Mittelkurven dargestellt. Detaillierte Angaben zu den erreichten Ausziehfestigkeiten sind dem Anhang A zu allen Versuchsserien zu entnehmen. In dem zusammenfassenden Diagramm sind Ausziehfestigkeiten in Abhängigkeit der Einbinde-länge, Gewindedurchmesser und dem Lastwinkel dargestellt. Die Mantelfläche und Ausziehfestigkeit ist mit dem Nenndurchmesser der Gewindestange berechnet.

Parallel zur Faserrichtung 0°

Die Versuche mit Einklebelängen $l_{ad} = 15d$ und $20d$ führten fast ausschliesslich zu Stahlversagen. Ein Prüfkörper M12 (Serie 04) ergab ein Klebeverbundversagen, allerdings auf wesentlich niedrigerem Niveau (11 N/mm^2) im Vergleich zu den mittleren Ausziehfestigkeiten zwischen 14.3 und 15.6 N/mm^2 . Demgegenüber erreichten alle Versuche mit Einklebelängen $l_{ad} = 10d$ ein Klebeverbundversagen. Mit einer Einklebelänge zwischen $10d$ und $15d$ ist demnach die volle Traglast der eingeklebten Gewindestangen mit einer Stahlfestigkeit von 8.8 erreicht.

Die Prüfserie 7 mit einer Rückversetzung der Einbinde-länge von $2d$ durch abdrehen des Gewindes führte zu keiner Verbesserung der Ausziehfestigkeit. Die Erhöhung der Rückversetzung auf $5d$ zeigte eine Reduzierung der Streuung und des Wertes der Ausziehfestigkeit. Eine Verbesserung der Ausziehfestigkeit konnte nur in der Versuchsreihe M15 mit dem herkömmlichen Klebstoff Loctite® CR421 erreicht werden, vgl. Abb. 34. In allen Varianten mit Vorholz konnte das Versagen infolge Aufspaltens ausgeschlossen werden.



Abb. 32: Schubversagen des Holzes im Bereich der Klebefuge, Serie 7



Abb. 33: Stahlversagen, Serie 04

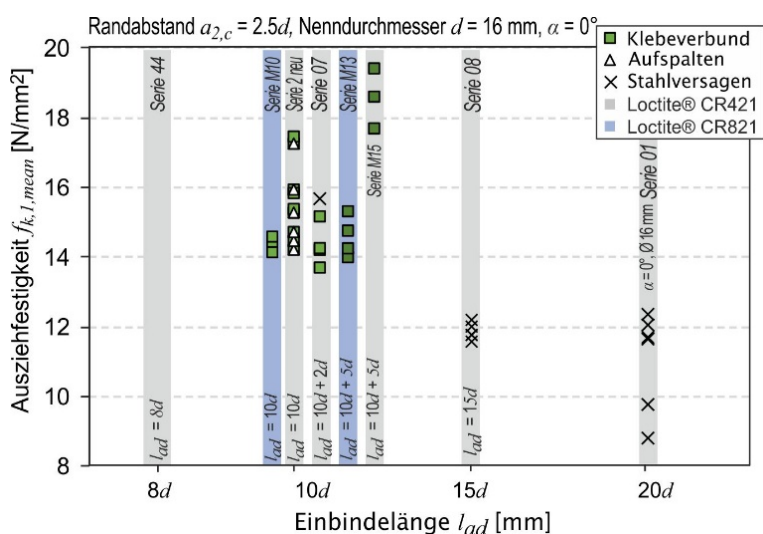


Abb. 34: Ausziehfestigkeiten in Abhängigkeit der Einbinde-länge für parallel zur Faser eingeklebte und beanspruchte Stahlstäbe, für konstanten Nenndurchmesser 16 mm

Senkrecht zur Faserrichtung 90°

Senkrecht zur Faser wurde zusätzlich zur Einbindelänge von $10d$, die Einbindelänge von $15d$ für M12 und M16 geprüft. Bei einer Einbindelänge von $10d$ und Durchmesser M12 wird Stahlversagen erreicht, bei M16 versagt der Anschluss infolge Klebeverbund, vgl. Abb. 42. Die Ausziehfestigkeiten liegen höher als für 0° und 45° zur Faser beanspruchte Anschlüsse. Ab einer Einbindelänge von $15d$ wird stets bei einer Beanspruchung senkrecht zur Faser Stahlversagen erreicht.



Abb. 35: Ausbildung von Druckstreben im unteren Bereich, Kohäsionsversagen des Klebstoffes, Serie 10

Lastwinkel von 45° zur Faserrichtung

Für Anschlüsse unter einer Beanspruchung von 45° zur Faserrichtung stellt sich ein gleiches Verhalten ein wie für 90° beanspruchte Anschlüsse. Für eine Einbindelänge von $15d$ tritt Stahlversagen ein und für $10d$ werden höher Ausziehfestigkeiten im Klebeverbund als für eine Beanspruchung unter 0° zur Faserrichtung erreicht, vgl. Abb. 42.



Abb. 37: Stahlversagen, Serie 11

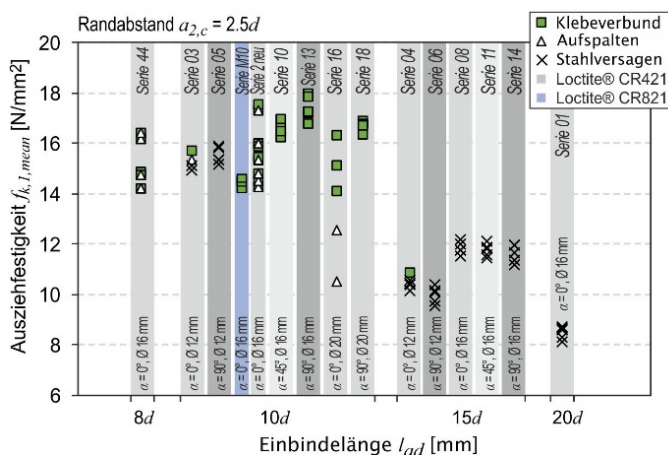


Abb. 38: Ausziehfestigkeiten in Abhängigkeit der Einbindelänge für variierenden Lastwinkel und Nenn-durchmesser, ohne Berücksichtigung der Vorholzuntersuchung

Der Einfluss der Einbindelänge für Anschlüsse in Buchenholz kann ab einer Einbindelänge von $15d$ und Gewindestangendurchmesser ab M16 unabhängig vom Lastwinkel ein Stahlversagen prognostiziert werden. Für eine Einbindelänge von $10d$ wird in Abhängigkeit vom Durchmesser Stahlversagen (M12) oder Klebeverbund respektive Aufspalten (M16) erreicht. Die

Ausziehfestigkeiten für parallel zur Faser beanspruchte sind geringer als für unter einem Winkel zur Faser beanspruchte Anschlüsse. Die Berücksichtigung einer Vorholzlänge für parallel zur Faser beanspruchte Anschlüsse führt zu Reduzierung der Gefahr des Aufspaltens und der Varianz in der Ausziehfestigkeit. Die Ausziehfestigkeit mit dem Klebstoff Loctite® CR421 führte zu einer Steigerung der Ausziehfestigkeit.

4.5 Prüfung des Randabstand $a_{2,c}$

Zur Prüfung des Randabstandes wurden Prüfserien mit parallel und senkrecht zur Faserrichtung eingeklebten und beanspruchten Stahlstäbe untersucht. Die Prüfserien variieren im Randabstand von $1.5d$ bis $3.5d$, siehe Tab. 5. In der zusammenfassenden Abb. 42 sind die auf die Mantelfläche der Gewindestange bezogenen Ausziehfestigkeiten dargestellt. Die Mantelfläche ist mit dem Nenndurchmesser der Gewindestange berechnet. Die Versuche werden nach dem Auswertungsschema im Abschnitt 3.3 anhand der maximalen Tragfähigkeit ausgewertet. Detaillierte Angaben zu den erreichten Ausziehfestigkeiten sind dem Anhang A zu allen Versuchsserien zu entnehmen.

Tab. 5: Serien zur Beurteilung des Randabstandes bei Einzelgewindestange

Nr.	α	Nenndurchmesser d [mm]	Bohrdurchmesser d_{hole} [mm]	Randabstand $a_{2,c}$ [mm]	Einbindelänge l_{ad}	Anzahl VM	Querschnitt $b/h/l$ [mm]	Anzahl Versuche
20	0°	16	16+4	$1.5d$	10d/160 mm	1	48/48/780	5
2_neu	0°	16	16+4	$2.5d$	10d/160 mm	1	80/80/620	5
M10	0°	16	16+4	$2.5d$	10d/160 mm	1	80/80/620	5
46	0°	16	16+4	$2.5d$	10d/160 mm	1	80/80/620	5
42	0°	16	16+4	$3.5d$	10d/160 mm	1	112/112/620	5
M22	0°	16	16+4	$1.5d$	10d+5d/160+80 mm	1	48/48/780	3
44	0°	16	16+4	$2.5d$	8d/128 mm	1	80/80/556	3
43	0°	16	16+4	$3.5d$	8d/128 mm	1	112/112/556	5
22	0°	16	16+4	$3.5d$	15d/160 mm	1	112/112/780	5
23	90°	16	16+4	$1.5d$	10d/160 mm	1	48/385/240	5
13	90°	16	16+4	$2.5d$	10d/160 mm	1	80/235/240	5
25	90°	16	16+4	$3.5d$	10d/160 mm	1	112/170/240	5

Parallel zur Faser

Der Einfluss des Randabstandes $a_{2,c}$ für parallel zur Faserrichtung eingeklebte Gewindestangen erfolgte mit konstantem Gewindestangendurchmesser (M16) aber unterschiedlichen Einbindelängen. Die Traglastkurven je Prüfserie sowie der Vergleich der gemittelten Kurven sind in Anhang A enthalten. Für Randabstände von $1.5d$ versagten alle Prüfkörper ohne Vorholzlänge auf Aufspalten, was auch anhand der geringeren Ausziehfestigkeit ersichtlich ist, vgl. Abb. 39. Bei $2.5d$

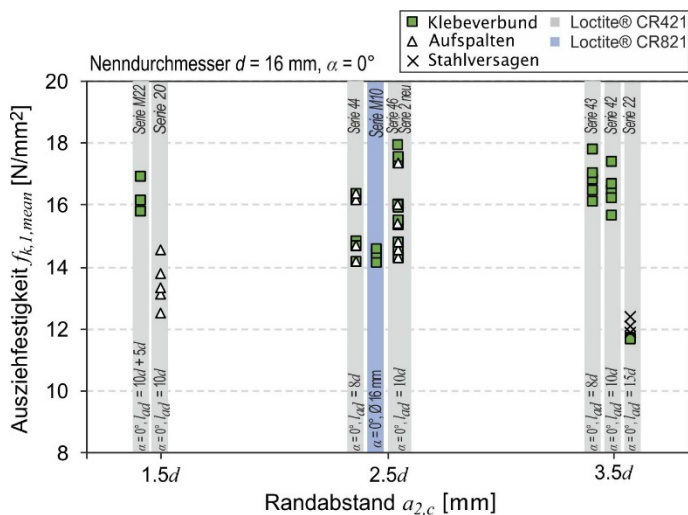


Abb. 39: Ausziehfestigkeiten in Abhängigkeit des Randabstandes $a_{2,c}$ für parallel zur Faser beanspruchte Anschlüsse

erfolgte teilweise das Versagen durch Aufspalten, aber auch auf gleichem Niveau wie beim Auszugsversagen, so dass hier die Grenze zwischen den beiden Versagensarten liegt. Bei der neuen Serie mit um $5d$ rückversetzter Einbindelänge konnte das Aufspalten ausgeschlossen und die gleiche Ausziehfestigkeit wie bei grossen Randabständen erreicht werden.

Senkrecht zur Faser

Der Einfluss des Randabstandes $a_{2,c}$ für senkrecht zur Faserrichtung eingeklebte Gewindestangen wurde mit konstanter Einbindelänge $l_{ad} = 10d$ sowie konstantem Gewindestangendurchmesser (M16) untersucht. Die Traglastkurven je Prüfserie sowie der Vergleich der gemittelten Kurven sind in Anhang A Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. enthalten. Als Versagen wurde Kohäsionsversagen der Klebefuge respektive der Verbund zwischen Klebstoff und Holz festgestellt, vgl. Abb. 40 und Abb. 41. Mit keinem der Randabstände tritt ein Aufspalten des Holzes auf. Die Ausziehfestigkeiten sind auf annähernd gleichem Niveau (17.0 N/mm^2 für $a_{2,c} = 1.5d$, 17.4 N/mm^2 für $a_{2,c} = 2.5d$ und 16.6 N/mm^2 für $a_{2,c} = 3.5d$), so dass eine Abhängigkeit ausgeschlossen wird, vgl. Abb. 42.



Abb. 40: Kohäsionsversagen des Klebstoffes, Serie 13



Abb. 41: Versagen des Verbundes Holz-Klebstoff, Serie 25

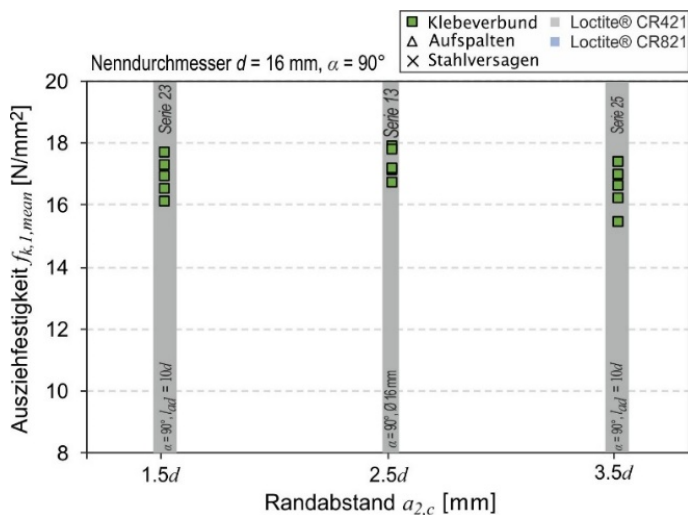


Abb. 42: Ausziehfestigkeiten in Abhängigkeit des Randabstandes $a_{2,c}$ für senkrecht zur Faser beanspruchte Anschlüsse

5 Hauptversuchsprogramm

5.1 Allgemeines

Im Hauptversuchsprogramm sollen anhand von realistischeren Anschlüssen mit mehreren eingeklebten Gewindestangen und somit höheren Traglasten das Bemessungskonzept weiter validiert werden. Dabei kann im Vergleich zu den Einzelgewindestangenversuchen ein Gruppeneffekt analysiert werden. Weiterhin soll validiert werden, ob sich bei mehreren Gewindestangen z. B. eher ein Aufspalten eintritt. In den Gruppen soll auch die Ausnutzung zu 100 % hin untersucht werden. Im Weiteren werden somit verschieden Aspekte betrachtet und gegenübergestellt.

5.2 Verbindungen mit mehreren Gewindestangen, $\alpha = 0^\circ$, (Zug-Zug-Versuch)

Die Prüfserien umfassen Anschlüsse mit insgesamt $n = 2 \times 2 = 4$ Gewindestangen, vgl. Abb. 43. Das Prüfprogramm ist in Tab. 6 zusammenfassend dargestellt und beinhaltet eine Variation des Randabstandes wie auch der Einbindelänge mit Berücksichtigung einer Vorholzlänge. Je Variante sind 3 Prüfkörper getestet worden. Die Prüfkörper wurden im Technologiepark der BFH vorbereitet und mit einer senkrechten Verfüllung des Klebstoffes hergestellt. Die Prüfkörper wurden vor der Herstellung und bis zur Prüfung im Normalklima beim 20°C und 65 % relativer Luftfeuchte gelagert. Die mittlere Holzfeuchte betrug 10 M%. Die Versuche wurden nach dem Auswertungsschema im Abschnitt 3.3 anhand der maximalen Tragfähigkeit ausgewertet. Detaillierte Angaben zu den erreichten Ausziehfestigkeiten sind dem Anhang A zu allen Versuchsserien zu entnehmen.

Die Lastverschiebungskurven der einzelnen Prüfungen wie auch der Vergleich der gemittelten Lastverschiebungskurven sind in Anhang A dargestellt. Alle Anschlüsse des Prüfprogrammes weisen ein Ausziehen der Gewindestange, ein Klebeverbundversagen auf, vgl. exemplarisch Abb. 44. In Abb. 45 sind die Ausziehfestigkeiten der Einzelstangen und Gruppen mit $10d$ und $10+5d$ gegenübergestellt. Es ist ersichtlich, dass mit reduziertem Randabstand bei einer Einklebelänge von $10d$, bedingt durch das Aufspalten, für Einzelstangen und besonders bei Gruppen, eine geringere Festigkeit erzielt wird. Mit einem Rückversetzen des Einklebebereiches um $5d$ erhöht sich zum einen die Festigkeit bei Einzelstangenverbindungen und zum anderen wird das Aufspalten bei beiden Verbindungsarten verhindert. Die Festigkeiten der Gruppe liegt für alle Randabstände auf gleichem Niveau. Die Ausziehfestigkeit der Gruppe ist geringer als die der Einzelstange, eine lineare Aufsummierung ist zu prüfen.

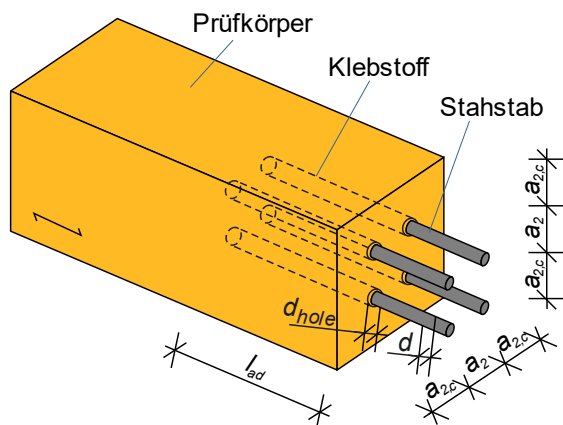


Abb. 43: Prinzipskizze zu 2x2 Gewindestangengruppe, parallel zur Faserrichtung

Tab. 6: Serien zur Beurteilung des Randabstandes bei Gewindestangengruppen

Nr.	α	Nenndurch- messer d [mm]	Bohrdurch- messer d_{hole} [mm]	Randab- stand $a_{2,c}$ [mm]	Verbindungs- mittelabstand a_2 [mm]	Einbin- delänge l_{ad}	Anzahl VM	Querschnitt $b/h/l$ [mm]	Anzahl Versuche
26	0°	16	16+2	$2,5d$	$5,0d$	$10d$	2x2	160/160/620	3
27	0°	16	16+2	$2,5d$	$5,0d$	$10d+5d$	2x2	160/160/780	3
28	0°	16	16+2	$2,0d$	$4,0d$	$10d+5d$	2x2	128/128/780	3
29	0°	16	16+2	$1,75d$	$3,5d$	$10d+5d$	2x2	112/112/780	3

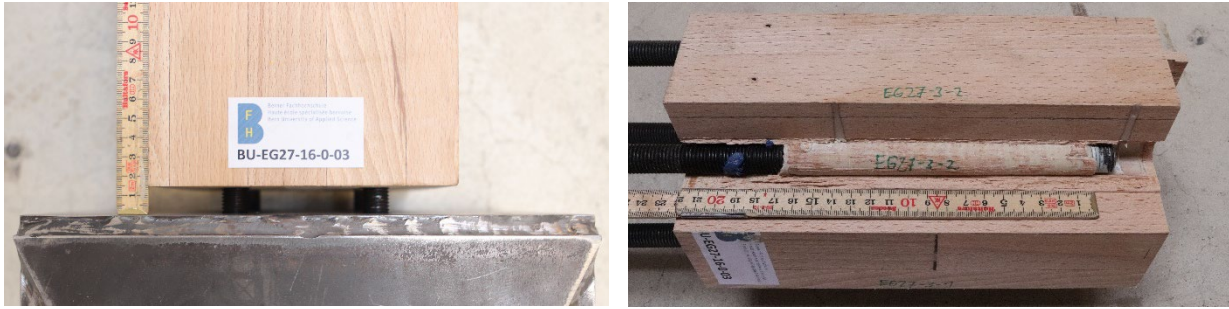


Abb. 44: Exemplarischer Klebeverbundversagensfall in der Prüfserie BU-EG27-16-0-03

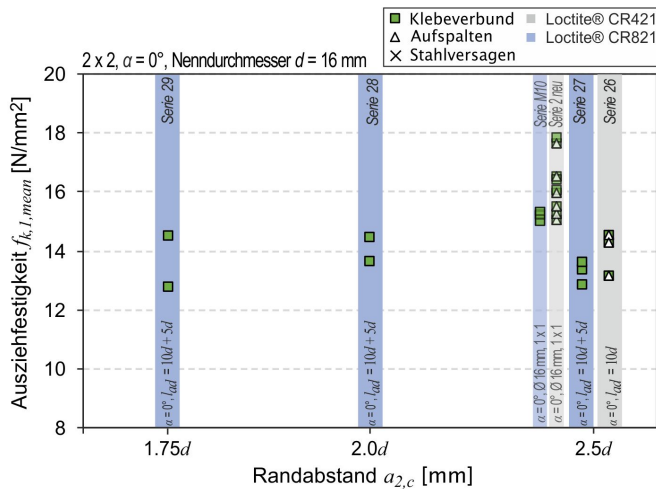


Abb. 45: Ausziehfestigkeiten der Anschlüsse mit $n = 2 \times 2$ in Bezug auf die Randabstände und im Vergleich zu Prüfserien mit einer Gewindestange mit ähnlichen Parametern

5.3 Verbindungen mit mehreren Gewindestangen, $\alpha = 90^\circ$, (Zug-Druck-Versuch)

Die Prüfserien umfassen Anschlüsse mit insgesamt $n = 2 \times 2 = 4$ Gewindestangen die senkrecht zur Faser eingebracht und belastet werden, vgl. Abb. 46. Das Prüfprogramm ist in Tab. 7 zusammenfassend dargestellt und beinhaltet eine Variation des Randabstandes wie auch Verbindungsmittelabstandes. Je Variante sind 3 Prüfkörper getestet wurden. Die Prüfkörper sind im Technologiepark der BFH vorbereitet und mit einer senkrechten Verfüllung des Klebstoffes hergestellt wurden. Die Prüfkörper wurden vor der Herstellung und bis zur Prüfung im Normalklima beim 20°C und 65 % relativer Luftfeuchte gelagert. Die mittlere Holzfeuchte betrug 10 M%. Die Versuche wurden nach dem Auswertungsschema im Abschnitt 3.3 anhand der maximalen Tragfähigkeit ausgewertet. Detaillierte Angaben zu den erreichten Ausziehfestigkeiten sind dem Anhang A zu allen Versuchsserien zu entnehmen.

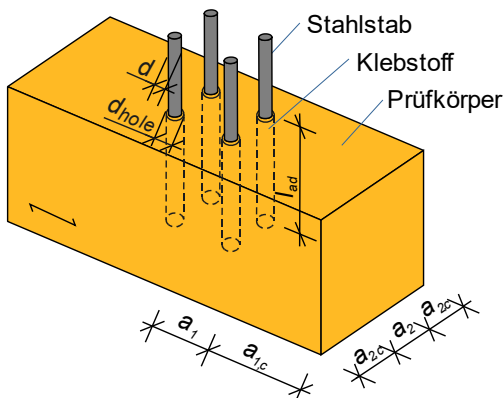


Abb. 46: Prinzipskizze zu 2x2 Gewindestangen, senkrecht zur Faserrichtung eingeklebt

Tab. 7: Serien zur Beurteilung des Randabstandes bei Einzelgewindestange

Nr.	α	Nenndurch- messer d [mm]	Bohrdurch- messer d_{hole} [mm]	Randab- stand $a_{2,c}$ [mm]	Verbindungs- mittelabstand a_2 [mm]	Einbin- delänge l_{ad}	Anzahl VM	Querschnitt $b/h/l$ [mm]	Anzahl Versuche
34	90°	16	16+2	2,5d	5,0d	10d	2x2	160/300/500	3
35	90°	16	16+2	2,0d	4,0d	10d	2x2	128/300/500	3
36	90°	16	16+2	1,75d	3,5d	10d	2x2	108.8/300/500	3

Die Lastverschiebungskurven der einzelnen Prüfungen wie auch der Vergleich der gemittelten Lastverschiebungskurven sind in Anhang A dargestellt. Alle Anschlüsse des Prüfprogrammes weisen am Ende der Einbindelänge ein Aufspalten durch Überschreiten der Querkzugfestigkeit auf. Die Gewindestangen selbst zeigen eine hohen Haftverbund auf, der zu einem Blockschubversagen der Gewindestangenreihen führte, vgl. Abb. 47.

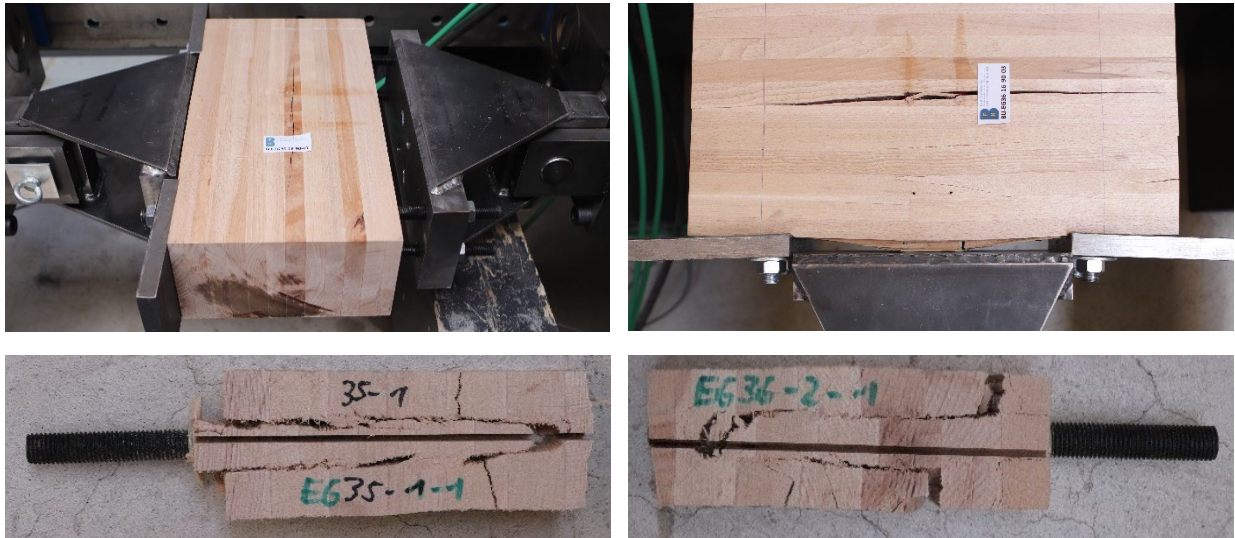


Abb. 47: Exemplarisches Versagensverhalten der Anschlüsse mit $n = 2 \times 2$ senkrecht zur Faser, Querkzugversagen (oben links und rechts) und Blockschubversagen (unten links und rechts)

In Abb. 48 sind die Ausziehfestigkeiten je Gewindestange der Gruppe und der relevanten Einzelstangen gegenübergestellt. Es ist ersichtlich, dass mit reduziertem Randabstand eine geringere Festigkeit erzielt wird. Gleichfalls wird aber auch eine geringere Festigkeit gegenüber der vergleichbaren Einzelstange erreicht, eine lineare Aufsummierung ist zu prüfen. Das aufgetretene Blockschubversagen ist in weiteren Forschungsprojekten zu prüfen. Durch eine Mindesteinkleblänge von $15d$ sollte dies verhindert werden können.

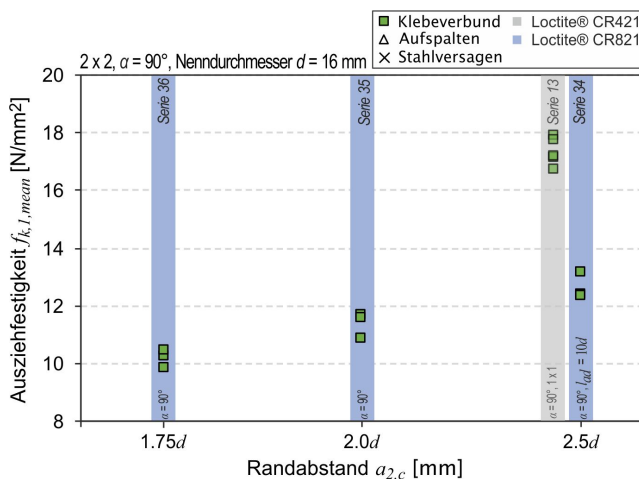


Abb. 48: Ausziehfestigkeit für $n = 2 \times 2$ Anschlüsse, 90° zur Faser eingeklebt und beansprucht, in Abhängigkeit des Randabstandes, Vergleich zu relevanten Anschlüssen mit $n = 1$ Gewindestangen

6 Bemessungsvorschlag

6.1 Bemessungsmodelle

Die SN EN 1995-1-1:2014 enthält keine weiterführenden Informationen zur Bemessung der Tragfähigkeit. Zur Abschätzung der Tragfähigkeit kann das Bemessungsmodell der DIN EN 1995-1-1/NA:2010 genutzt werden. Der Auszieh Widerstand ergibt sich zu

$$F_{ax,Rd} = \min \left\{ \begin{array}{ll} f_{y,d} \cdot A_{ef} & \text{Stahlversagen} \\ \pi \cdot d \cdot l_{ad} \cdot f_{k,1,d} & \text{Versagen Klebeverbund} \end{array} \right\} \quad (2)$$

mit:

$f_{y,d}$	Streckgrenze des Stahlstabes
A_{ef}	Spannungsquerschnitt Stahlstab
l_{ad}	Einklebelänge $l_{ad,min} = \max \{0.5d^2; 10d\}$
d	Nenn Durchmesser Stahlstab
$f_{k,1,d}$	Klebefugenfestigkeit

6.2 Randabstände

Die Randabstände dürfen, unter der Massgabe, dass Aufspalten verhindert wird, zu $a_{1,c} = a_{2,c} = 1.75d$ und die Achsabstände zu $a_4 = 3.5d$ für parallel zur Faserrichtung und $a_1 = a_4 = 4d$ rechtwinklig zur Faserrichtung verwendet werden. Damit sind Ausnutzungen von fast 100 % zum Holzquerschnitt möglich, siehe Abb. 49.

Das Verhindern des Aufspaltens konnte in den Untersuchungen durch ein Rückversetzen der Einbindelänge um $5d$ (Abdrehen des Gewindeanteils, Reduktion des Stahlstangenquerschnittes) erreicht werden. Weiterhin kann infolge der Reduktion des Stahlstangenquerschnittes das Versagen in den Stahlstangen niedriger als des Ausziehversagen ausgelegt und somit eine Duktilität erreicht werden. Für eine gesicherte Prognose muss die Stahlzugfestigkeit bekannt sein (z. B. durch Prüfung).

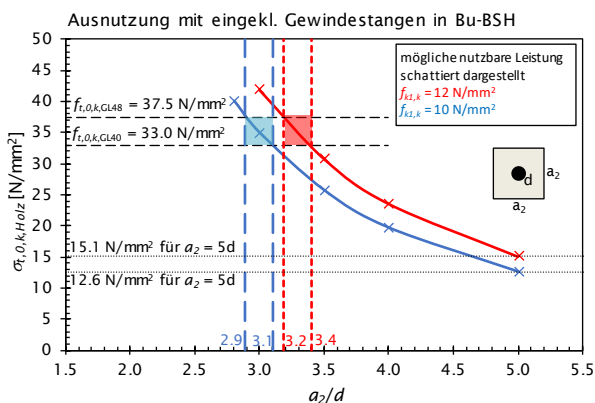


Abb. 49: Notwendige Radabstände für volle Ausnutzung der Holzquerschnitte; in Anlehnung an Gehri (2009)

6.3 Ausziehfestigkeiten

Die Versuchsreihen wurden in Buchenbrettschichtholz mit einer mittleren Rohdichte von 700 kg/m^3 und einer mittleren Ausgleichsfeuchte von $u = 10 \%$ hergestellt und zum Teil geprüft. Die in den Prüfungen erhaltenen Traglasten wurden in Anlehnung an die SN EN 26891:1991 ausgewertet. Die erhaltenen Traglasten wurden dann in Abhängigkeit der Versagensart auf die Ausziehfestigkeit (bezogen auf den Nenn Durchmesser d) zurückgerechnet und bewertet. Im Detail kann eine Abhängigkeit der Ausziehfestigkeit in Abhängigkeit vom Kraft-Faser-Winkel beobachtet

werden. Senkrecht zur Faser eingeklebte Stahlstangen zeigen gegenüber parallel eingeklebten Stahlstangen eine etwas höhere Festigkeit. Zur Vereinfachung kann unabhängig vom Durchmesser und Kraft-Faser-Winkel eine konstante Ausziehfestigkeit festgelegt werden. Derzeitig ergibt sich auf Bruchniveau eine mittlere Ausziehfestigkeit von 15.5 N/mm^2 mit einer Variation von 10.5 % und eine charakteristische Ausziehfestigkeit nach SE N EN 14358 von 12.6 N/mm^2 , siehe Abb. 50. Einklebelängen über $10d$ führten fast ausschliesslich zu Stahlversagen der verwendeten Gewindestangen mit einer Festigkeitsklasse 8.8.

Im Kapitel 5.2 sind die Ausziehfestigkeiten bezogen auf den Randabstand dargelegt. Für Randabstände von $2.5d$ erfolgte teilweise ein Aufspalten der Prüfkörper mit parallel zur Faser eingeklebten Gewindestangen und führten zu einer reduzierten Traglast. Kleinere Randabstände führten immer zu einem Aufspalten. Durch ein Rückversetzen der Einklebelänge um $5d$ konnte jedoch bei Einzelstangen und Gruppen das Aufspalten konsequent ausgeschlossen werden. Für senkrecht zur Faser eingeklebte Gewindestangen wurde kein Aufspalten beobachtet.

In Abb. 51 links sind die errechneten Traglasten lt. DIN EN 1995-1-1/NA:2010 unter Anwendung des konstanten mittleren Ausziehparameters von 15.5 N/mm^2 und Berücksichtigung eines Stahlversagens den experimentellen Traglasten gegenübergestellt. Die einzelnen Versagensarten wurden farblich unterschieden, so ist sehr gut ersichtlich, dass in einigen Serien das Stahlversagen oder das Aufspalten zu deutlichen Überschätzungen führen würde.

Durch Berücksichtigung des Stahlversagens und Elimination der deutlich abweichenden Aufspaltergebnisse (mit der Vorgabe, dass in der zukünftigen Anwendung ein Aufspalten verhindert wird) ergibt sich eine sehr gute lineare Abhängigkeit und Korrelation der im Versuch erreichten Traglasten mit dem Bemessungskonzept, siehe Abb. 51 rechts. Durch die Verwendung einer Ausziehfestigkeit von 14.8 N/mm^2 ergibt sich im Mittel eine 100%-ig Abschätzung.

Mit Überführung des Bemessungskonzepten auf ein charakteristisches Niveau ergeben sich die in Abb. 52 dargelegten Abhängigkeiten. Mit einer charakteristischen Festigkeit von 12.0 N/mm^2 und 10.0 N/mm^2 bzw. Bemessungsfestigkeit von 7.4 N/mm^2 und 6.2 N/mm^2 werden die Lasten zu 84 % bzw. 72 % abgeschätzt.

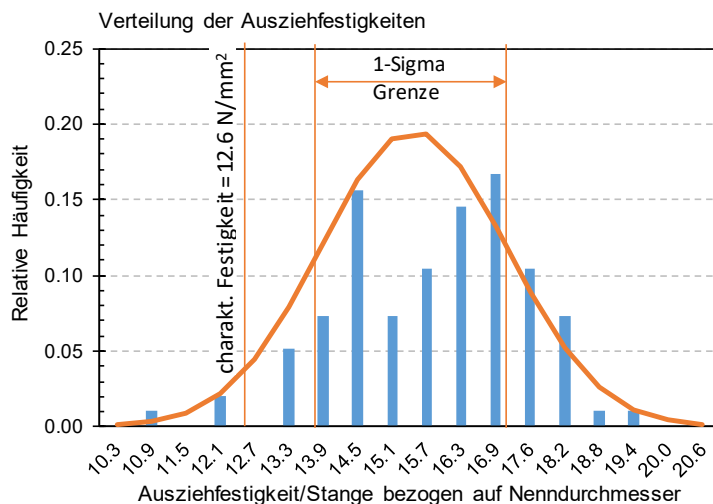


Abb. 50: Verteilung der Ausziehfestigkeiten für eingeklebte Gewindestangen

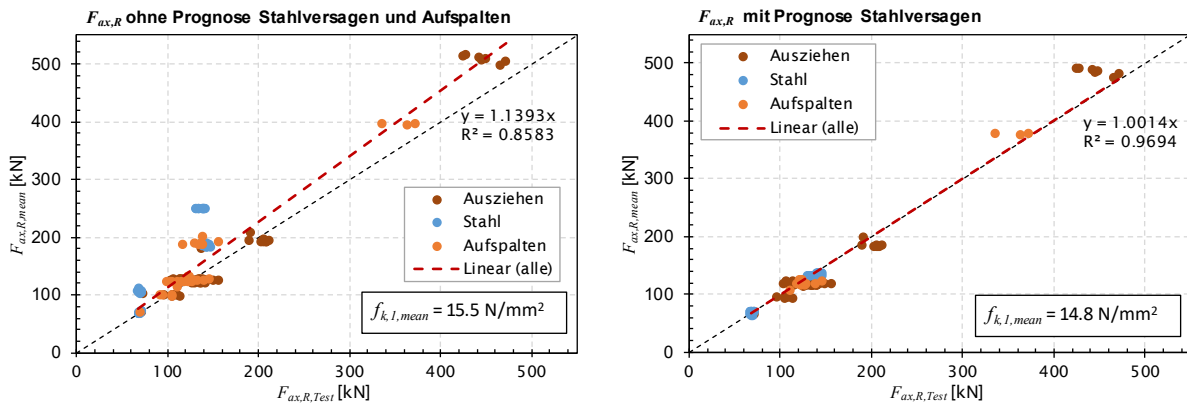


Abb. 51: Vergleich der errechneten Traglasten mit dem Ansatz des Bemessungskonzeptes: links ohne und rechts mit Berücksichtigung des Stahlversagens

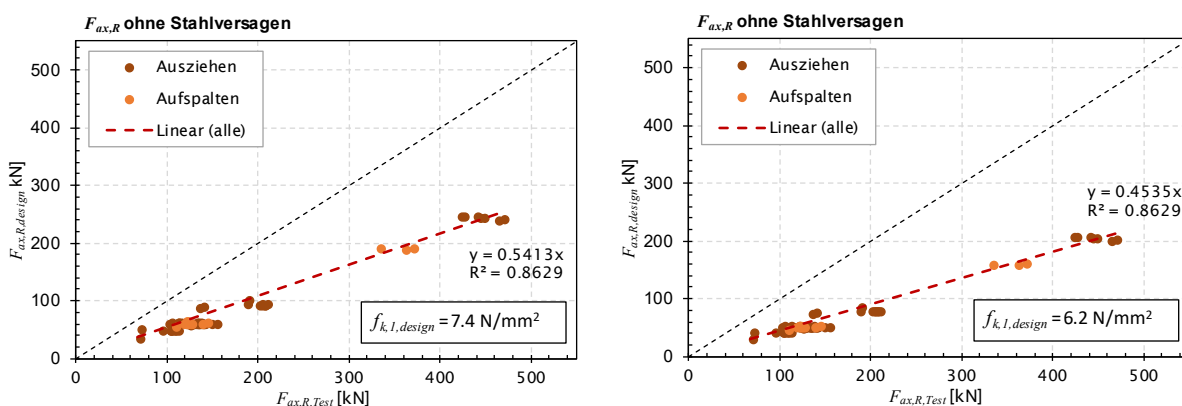


Abb. 52: Prognose der Traglasten mit Bemessungsfestigkeiten von 7.4 und 6.2 N/mm²

6.4 Qualitätssicherung

Für die Qualitätssicherung während der Ausführung von Anschlüssen mit eingeklebten Stäben/Gewindestangen ist eine Qualitätskontrolle zwingend lt. SIA 265:2012 (8.3.1) einzuhalten. Hierfür sind für die Ausführungen und Vorbereitungen des Bohrloches, die Eignung des Klebstoffes und das Verkleben/Injizieren des Klebstoffes für eingeklebte Stäbe/Gewindestangen in Buchenholz zu regeln. Ausgehend von dem Stand der Technik für Nadelholz, der in der SIA 265:2012 und der DIN EN 1995-1-1/NA:2010 normativ geregelt, in der Allgemeine Bauaufsichtliche Zulassung (Z-9.1-778) der GSA® Technologie ausführlich beschrieben und von Steiger (2012) erörtert und diskutiert ist, werden folgende Empfehlungen ausgesprochen.

- Je nach Herstellungsvariante (stehend – mit oder ohne Einfülllöcher, liegend) sollten die Einfülllöcher für den Klebstoff vor dem Stangenloch für die Gewindestange zu Bohren ausgeführt werden, um eventuelle Ausbrüche zu vermeiden, die die Klebstoffverteilung im Hohlraum beeinträchtigen könnten.
- Der Durchmesser des Bohrloches muss zwischen 2 mm und 4 mm grösser als der Nenn-durchmesser der Gewindestange sein.
- Um Aufspalten zu verhindern, muss die statisch wirksame Klebefuge um $5d$ in Bohrlochachse zurückversetzt werden. Damit in diesem Bereich von $5d$ kein Klebeverbund herrscht, darf entweder in diesen Bereich kein Klebstoff gepresst werden oder es muss das Gewinde der Stahlstange abgedreht werden.
- Vorbohren des Loches auf Langlochbohrmaschine (1500 U/min, Vorschub ca. 2300 mm/min). Es muss gewährleistet sein, dass die Bohrlochwandung nicht verbrannt ist, da dies zu einer erheblichen Reduzierung der Klebefugenfestigkeit führt.

- Endgültige Bohrung mit Handbohrmaschine und Schlangenbohrer. Es muss sehr genau gearbeitet werden, da die Bohrungen verlaufen können. Unter dieser Voraussetzung empfiehlt es sich, eine Bohrführung oder Schablone zu verwenden.
- Die Bohrlöcher müssen vor dem Einbringen gereinigt werden (z. B. Ausblasen mit fettfreier Druckluft)
- Die Zugfestigkeit der Gewindestange sind pro Gewindestangencharge zu prüfen.
- Gewindestangen müssen nach Zuschnitt entfettet/-ölt werden. Hierfür kann z. B. Aceton als Reinigungsmittel verwendet werden.
- Vor dem Einpressen des Klebstoffes muss sichergestellt sein, dass die Gewindestange zentrisch im Bohrloch platziert ist zur Vermeidung von ungleichmässigen starken Klebefugen und Exzentrizität. Es können Gewindekappen am Bohrlochende und Distanzhülsen bei der Bohrlochöffnung eingesetzt werden. Die Gewindestangen müssen während des Einpressvorgangs in Position gehalten werden. Die Materialisierung spielt dabei keine Rolle, da diese nicht als tragend wirksam angesehen werden. Es ist darauf zu achten, dass die Bohrlochlänge dem der Zentriermittel geschuldeten Höhe entsprechend tiefer gebohrt werden müssen, zur Sicherstellung der erforderlichen Einbindelänge (Mantelfläche). Die Einfülllöcher müssen die untere und obere Begrenzung der Einbindelänge tangieren, damit sich keine Lufteinschlüsse bilden.
- Beim Verkleben muss auf die Angaben des Klebstoffherstellers zu u.a. Holzfeuchtebereich, Verarbeitungsklima, Topf- und Aushärtezeit geachtet werden. Es sind die Sicherheitsvorschriften der Hersteller einzuhalten (Handschuhe, Schutzbrille usw.).
- Unter Verwendung von 2-Komponenten-Klebstoffen in Kartuschen muss gewährleistet sein, dass die zwei Komponenten gut vermischt sind. Auch mit den Mischaufrührern kann es vorkommen, dass bei jeder neuen Kartusche die Komponenten sichtbar am Klebstoffaustrittloch ungenügend gemischt sind. Es empfiehlt sich zuerst Klebstoff auszupressen und dann mit dem Verkleben zu beginnen.
- Kartuschenwechsel im gleichen Stangenloch sollen vermieden werden, da durch erneutes Ansetzen Luft in den Hohlraum eintreten kann.
- Die Einpressgeschwindigkeit sollte maximal bei ca. 20 mm/s liegen (ungefährer Wert basierend auf $v_E = l_{ad}/t = 160 \text{ mm}/8 \text{ Sekunden}$), um eine gleichmässige Klebstoffverteilung sicherstellen zu können.
- Klebstoffproben zur Qualitätskontrolle und -nachweis erstellen.

7 Zusammenfassung

In den einzelnen Abschnitten sind die erreichten Ausziehfestigkeiten der eingeklebten Gewindestangen jeweils im Vergleich dargestellt. Es konnten somit verschiedene Einflussparameter bewertet werden. Generell zeigen eingeklebte Gewindestangen in Buche hohe Ausziehfestigkeiten im Vergleich zu Nadelholz und ergeben ein Stahlbruch der Gewindestange bei $1.5d$ Einbindelänge. Eine Abhängigkeit der Festigkeit gegenüber dem Gewindestangendurchmesser konnte nicht erkannt werden. Die Festigkeiten parallel zur Faserrichtung liegen unter denen der Versuche unter 45° und 90° . Für eine einfache Anwendung und Berechnung wird ein konstanter Wert vorgeschlagen.

Für die Bemessung von Anschlüssen mit eingeklebten Stäben/Gewindestangen kann der Ansatz der DIN EN 1995-1-1/NA:2010 als Empfehlung genutzt werden. Wobei die Ausziehfestigkeit $f_{k,1}$ zu 12 N/mm^2 vorgeschlagen wird. Die Mindestrand- und Verbindungsmittelabstände $a_{1,c}$ und $a_{2,c}$ können gegenüber der DIN EN 1995-1-1/NA:2010 unter Vermeidung des vorzeitigen Aufspaltens auf $1.75d$ reduziert werden. Damit sind hohe Ausnutzungen der Holzquerschnitte möglich. Das Aufspalten konnte in allen Versuchen durch das Zurückversetzen der Einbindelänge um $5d$ verhindert werden. Ein Blockscherversagen der Verbindungsmittelreihen bei quer zur Faser eingeklebten Gewindestangen muss ebenfalls beachtet werden. Dies kann durch eine grössere Einbindelänge erreicht werden. Dies sollte in weiterer Forschung genauer untersucht werden.

Die Bewertung der Tragfähigkeit von Anschlüssen mit eingeklebten Stäben/Gewindestangen soll nach Steiger (2012) als ganzheitliches System betrachtet werden. Für leistungsfähige Anschlüsse sollte eine Abstimmung der Querschnittsflächen von Stahl A_{Stahl} und Holz A_{Holz} in Abhängigkeit der umgekehrten Proportionalität der Elastizitätsmoduln von Stahl E_{Stahl} und Holz E_{Holz} erfolgen, vgl. Gl. (3) und Steiger (2012).

$$E_{Holz} \cdot A_{Holz} = E_{Stahl} \cdot A_{Stahl} \quad (3)$$

In der Ausführung von Anschlüssen mit eingeklebten Stäben/Gewindestangen ist eine Qualitätskontrolle zwingend lt. SIA 265:2012 (8.3.1) einzuhalten. Hierin sind die Ausführungen und Vorbereitungen des Bohrloches, die Eignung des Klebstoffes und das Verkleben/Injizieren des Klebstoffes noch konkret für eingeklebte Stäbe/Gewindestangen in Buchenholz zu regeln.

8 Literaturverzeichnis

- Aicher S., Stapf G. (2017) Eingeklebte Stahlstäbe – state-of-the-art – Einflussparameter, Versuchsergebnisse, Zulassungen, Klebstoffnormung, Bemessungs- und Ausführungsregeln, 23. Internationales Holzbau-Forum IHF 2017, pp. 193-208
- Bengtsson C., Johansson C.J. (2002) GIROD – Glued in Rods for Timber Structures, SMT4-CT97-2199, SP Report 2002:26, Swedish National Testing and research Institute, Borås
- Chans O.D., Cimadevila J.E., Gutiérrez E. M.(2008) Glued joints in hardwood timber, International Journal of Adhesion & Adhesives 28 457–463
- Gehri E. 2009 Eingeklebte Anker – Anforderungen und Umsetzungen, 15. Internationales Holzbau-Forum, Garmisch-Partenkirchen
- Gehri E. 2010 High performing jointing technique using glued-in rods, http://support.sbcindustry.com/Archive/2010/june/Paper_095.pdf, 02.07.2019
- Grunwald C., Vallée T., Fecht S., Bletz-Mühldorfer O., Diehl F., Bathon L., Walther F., Scholz R., Myslicki S. (2018) Rods glued-in engineered hardwood products part I: Experimental results under quasi-static loading, International Journal of Adhesion and Adhesives (2018), <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2018.05.003>
- Grunwald C., Vallée T., Fecht S., Bletz-Mühldorfer O., Diehl F., Bathon L., Walther F., Scholz R., Myslicki S. (2018) Rods glued-in engineered hardwood products part II: Numerical modelling and capacity prediction, International Journal of Adhesion and Adhesives (2018), <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2018.05.004>
- Jensen J.L., Koizumi A., Sasaki T., Tamura Y., Iijima Y. (2001) Axially loaded glued-in hardwood dowels, Wood Science and Technology 35, pp. 73-83
- Meyer N. (2016) Verbindungen mit eingeklebten Gewindestangen in Bauteil aus Furnierschicht-holz aus Buche, Doktorandenkolloquium Holzbau "Forschung und Praxis" 2016: Stuttgart, 01./02. März 2016, Hrsg.: U. Kuhlmann
- Myslicki S., Walther F., Bletz-Mühldorfer O., Diehl F., Lavarec C., Beber V.C., Vallée T. (2019) Fatigues of glued-in rods in engineered hardwood products – Part I: experimental results, The Journal of Adhesion, <https://doi.org/10.1080/00218464.2018.1555477>
- Myslicki S., Walther F., Bletz-Mühldorfer O., Diehl F., Lavarec C., Beber V.C., Vallée T. (2019) Fatigues of glued-in rods in engineered hardwood products – Part II: Numerical modelling, The Journal of Adhesion, <https://doi.org/10.1080/00218464.2018.1555478>
- SIA 265:2012 Holzbau, Schweizer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich.
- SN EN 409:2009 Holzbauwerke-Prüfverfahren-Bestimmung des Fliessmomentes von stiftförmigen Verbindungsmitteln, Schweizer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich.
- SN EN 1380:2009 Holzbauwerke-Prüfverfahren-Tragende Verbindungen mit Nägeln, Schrauben, Stabdübeln und Bolzen, Schweizer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich.

- SN EN 1382:1999 Holzbauwerke-Prüfverfahren-Ausziehtragfähigkeit von Holzverbindungsmit-
teln, Schweizer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich
- SN EN 26891:1991 Holzbauwerke-Verbindungen mit mechanischen Verbindungsmitteln-Allge-
meine Grundsätze für die Ermittlung der Tragfähigkeit und des Verformungsverhaltens
- SN EN 28970:1991 Holzbauwerke-Prüfung von Verbindungen mit mechanischen Verbindungs-
mitteln, Anforderungen an die Rohdichte des Holzes, Schweizer Ingenieur- und Architekten-
verein, Zürich
- SN EN 14358:2016 Holzbauwerke- Berechnung und Kontrolle charakteristischer Werte, Europäi-
sches Komitee für Normung, Brüssel, 2015.
- ISO 10984-1:2009 Timber structures – Dowel Type fasteners, Part 1: Determination of yield mo-
ment, ISO, Genf, 2009.
- DIN EN 1995-1-1/NA:2010 Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 5:
Bmessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeins – Allgemeine Regeln
und Regeln für den Hochbau, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin
- Serrano E. (2000) Glued in rods for timber structures – A 3D model and finite element parameter
studies, International Journal of Adhesion and Adhesives 21 (2001) 115-127
- Steiger R., Gehri E., Widmann R. (2006) Pull-out strength of axially loaded steel rods bonded in
glulam parallel to the grain, Material and Structures 40, pp. 69-78
- Steiger R. (2012) In Brettschichtholz eingeklebte Gewindestangen – Stand des Wissens zu einer
leistungsfähigen Verbindungstechnik, 18. Internationales Holzbau-Forum, Garmisch-Parten-
kirchen
- Steiger, R., Serrano, E., Stepinac, M., Rajcic, V., O'Neill, C., McPolin, D., Widmann, R., 2015.
Strengthening of timber structures with glued-in rods, Construction and Building materials
97, pp 90-105
- Steiger, R., Serrano, E., Stepinac, M., Rajcic, V., O'Neill, C., McPolin, D., Widmann, R., 2015. Re-
inforcement with glued-in rods. In: Reinforcement of timber structures, A state-of-the-art
report, Ed.: Harte, A., Dietsch, 133-159
- Stepinac M., Rajcic V., Hunger F., Serrano E. (2013) Comparison of design rules for glued-in
rods and design rule proposal for implementation in European standards, CIB W18/46-7-
10, Meeting, Vancouver, Canada
- Widmann R., Steiger R., Gehri E. (2007) Pull-out strength of axially loaded steel rods bonded in
glulam perpendicular to grain, Materials and Structures 40, pp. 827-838
- Steiger R., Strahm T. (2013) Geklebt, nicht gedreht, TEC21, 23/2013, pp. 23-24
- Zulassung Z-9.1-778 – 2K-EP-Klebstoff GSA Harz und GSA Härter für das Einkleben von Stahlstä-
ben in Holzbaustoffe, Deutsches Institut für Bautechnik
- Zulassung Z-9.1-791 – Verbindungen mit faserparallel in Brettschichtholz eingeklebten Gewin-
destangen für den Holzbau, Deutsches Institut für Bautechnik

Anhang A Ergebnisse der Auszugsversuche

A.1 Tragfähigkeit und Ausziehfestigkeit für Einbringversuche

BU-EG01-16-0	Gewindestange	Lastwinkel	Anzahl	Randabstand	Einklebelänge	Bohrlochdurchmesser	b	h	l	F_{\max}	Ausziehfestigkeit $f_{k1,mean}$	Ausziehfestigkeit $f_{Aufspalten,1,mean}$	Ausziehfestigkeit $f_{Stahl,1,mean}$
	M	Grad	n	$a_{2,c}$	l_{ad}	$d+2$	mm	mm	mm	kN	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
Probe 1	16	0	1	2.5d	20d	18	80	80	940	139.6			8.7
Probe 2	16	0	1	2.5d	20d	18	80	80	940	138.4			8.6
Probe 3	16	0	1	2.5d	20d	18	80	80	940	138.5			8.6
Probe 4	16	0	1	2.5d	20d	18	80	80	940	130.8			8.1
Probe 5	16	0	1	2.5d	20d	18	80	80	940	133.4			8.3
Probe 6	16	0	1	2.5d	20d	18	80	80	940	140.3			8.7
Mittelwert										136.1			8.5

BU-EG02-16-0	Gewindestange	Lastwinkel	Anzahl	Randabstand	Einklebelänge	Bohrlochdurchmesser	b	h	l	F_{\max}	Ausziehfestigkeit $f_{k1,mean}$	Ausziehfestigkeit $f_{Aufspalten,1,mean}$	Ausziehfestigkeit $f_{Stahl,1,mean}$
	M	Grad	n	$a_{2,c}$	l_{ad}	$d+2$	mm	mm	mm	kN	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
Probe 1	16	0	1	2.5d	20d	20	80	80	940	139.0			8.6
Probe 2	16	0	1	2.5d	20d	20	80	80	940	133.4			8.3
Probe 3	16	0	1	2.5d	20d	20	80	80	940	140.7			8.7
Probe 4	16	0	1	2.5d	20d	20	80	80	940	133.8			8.3
Probe 5	16	0	1	2.5d	20d	20	80	80	940	140.0			8.7
Probe 6	16	0	1	2.5d	20d	20	80	80	940	131.9			8.2
Mittelwert	16									137.4			8.5

BU-EG01-16-0 neu	Gewindestange	Lastwinkel	Anzahl	Randabstand	Einklebelänge	Bohrlochdurchmesser	b	h	l	F_{\max}	Ausziehfestigkeit $f_{k1,mean}$	Ausziehfestigkeit $f_{Aufspalten,1,mean}$	Ausziehfestigkeit $f_{Stahl,1,mean}$
	M	Grad	n	$a_{2,c}$	l_{ad}	$d+2$	mm	mm	mm	kN	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
Probe 1	16	0	1	2.5d	10d	18	80	80	620	106.2	12.8		
Probe 2	16	0	1	2.5d	10d	18	80	80	620	114.0	13.7		
Probe 3	16	0	1	2.5d	10d	18	80	80	620	106.5	16.3		
Probe 4	16	0	1	2.5d	10d	18	80	80	620	111.2	15.3		
Probe 5	16	0	1	2.5d	10d	18	80	80	620	122.4	14.8		
Mittelwert	16									112.0	14.6		

BU-EG02-16-0 neu	Gewindestange	Lastwinkel	Anzahl	Randabstand	Einklebelänge	Bohrlochdurchmesser	b	h	l	F_{\max}	Ausziehfestigkeit $f_{k1,mean}$	Ausziehfestigkeit $f_{Aufspalten,1,mean}$	Ausziehfestigkeit $f_{Stahl,1,mean}$
	M	Grad	n	$a_{2,c}$	l_{ad}	$d+2$	mm	mm	mm	kN	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
Probe 1	16	0	1	2.5d	10d	20	80	80	620	121.9	14.3	14.3	
Probe 2	16	0	1	2.5d	10d	20	80	80	620	124.3	14.5	14.5	
Probe 3	16	0	1	2.5d	10d	20	80	80	620	139.4	17.3	17.3	
Probe 4	16	0	1	2.5d	10d	20	80	80	620	145.7	17.6		
Probe 1a	16	0	1	2.5d	10d	20	80	80	620	119.1	14.8	14.8	
Probe 2a	16	0	1	2.5d	10d	20	80	80	620	123.5	15.4	15.4	
Probe 3a	16	0	1	2.5d	10d	20	80	80	620	127.2	16.0	16.0	
Probe 4a	16	0	1	2.5d	10d	20	80	80	620	128.1	15.9		
Probe 5a	16	0	1	2.5d	10d	20	80	80	620	123.0	15.5		
Mittelwert	16									124.2	15.7	15.4	

BU-EG03-12-0	Gewindestange	Lastwinkel	Anzahl	Randabstand	Einklebelänge	Bohrlochdurchmesser	b	h	l	F_{\max}	Ausziehfestigkeit $f_{k1,mean}$	Ausziehfestigkeit $f_{Aufspalten,1,mean}$	Ausziehfestigkeit $f_{Stahl,1,mean}$
	M	Grad	n	$a_{2,c}$	l_{ad}	$d+2$	mm	mm	mm	kN	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
Probe 1	12	0	1	2.5d	10d	16	60	60	540	70.3		15.4	
Probe 2	12	0	1	2.5d	10d	16	60	60	540	70.9			15.2
Probe 3	12	0	1	2.5d	10d	16	60	60	540	71.5	15.8		
Probe 5	12	0	1	2.5d	10d	16	60	60	540	71.2			15.0
Mittelwert	12									71.0	15.8	15.4	15.1

	Gewinde- stange	Last- winkel	Anzahl	Rand- abstand	Einklebe- länge	Bohrloch- durch- messer	b	h	l	F_{\max}	Auszieh- festigkeit $f_{k1,mean}$	Auszieh- festigkeit $f_{Aufspalten,1,mean}$	Auszieh- festigkeit $f_{Stahl,1,mean}$
BU-EG04-12-0	M	Grad	n	$a_{2,c}$	l_{ad}	$d+2$	mm	mm	mm	kN	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
Probe 1	12	0	1	2.5d	15d	16	60	60	660	70.9			10.5
Probe 2	12	0	1	2.5d	15d	16	60	60	660	71.5			10.5
Probe 3	12	0	1	2.5d	15d	16	60	60	660	69.6			10.1
Probe 4	12	0	1	2.5d	15d	16	60	60	660	71.2			10.4
Probe 5	12	0	1	2.5d	15d	16	60	60	660	72.1	10.9		
Mittelwert	12									71.1	10.9		10.4

	Gewinde- stange	Last- winkel	Anzahl	Rand- abstand	Einklebe- länge	Bohrloch- durch- messer	b	h	l	F_{\max}	Auszieh- festigkeit $f_{k1,mean}$	Auszieh- festigkeit $f_{Aufspalten,1,mean}$	Auszieh- festigkeit $f_{Stahl,1,mean}$
BU-EG05-12-90	M	Grad	n	$a_{2,c}$	l_{ad}	$d+2$	mm	mm	mm	kN	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
Probe 1	12	90	1	2.5d	10d	16	60	180	180	68.6			15.8
Probe 2	12	90	1	2.5d	10d	16	60	180	180	68.5			15.4
Probe 3	12	90	1	2.5d	10d	16	60	180	180	68.1			15.2
Probe 4	12	90	1	2.5d	10d	16	60	180	180	67.8			15.4
Probe 5	12	90	1	2.5d	10d	16	60	180	180	69.6			15.9
Mittelwert	12									68.6			15.5

	Gewinde- stange	Last- winkel	Anzahl	Rand- abstand	Einklebe- länge	Bohrloch- durch- messer	b	h	l	F_{\max}	Auszieh- festigkeit $f_{k1,mean}$	Auszieh- festigkeit $f_{Aufspalten,1,mean}$	Auszieh- festigkeit $f_{Stahl,1,mean}$
BU-EG06-12-90	M	Grad	n	$a_{2,c}$	l_{ad}	$d+2$	mm	mm	mm	kN	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
Probe 1	12	90	1	2.5d	15d	16	60	180	270	68.6			9.6
Probe 2	12	90	1	2.5d	15d	16	60	180	270	69.2			10.4
Probe 3	12	90	1	2.5d	15d	16	60	180	270	68.1			10.1
Probe 4	12	90	1	2.5d	15d	16	60	180	270	69.1			10.2
Probe 5	12	90	1	2.5d	15d	16	60	180	270	67.7			9.8
Mittelwert	12									68.5			10.0

	Gewinde- stange	Last- winkel	Anzahl	Rand- abstand	Einklebe- länge	Bohrloch- durch- messer	b	h	l	F_{\max}	Auszieh- festigkeit $f_{k1,mean}$	Auszieh- festigkeit $f_{Aufspalten,1,mean}$	Auszieh- festigkeit $f_{Stahl,1,mean}$
BU-EG07-16-0	M	Grad	n	$a_{2,c}$	l_{ad}	$d+2$	mm	mm	mm	kN	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
Probe 1	16	0	1	2.5d	10d	20	80	80	620	113.9	14.2		
Probe 2	16	0	1	2.5d	10d	20	80	80	620	110.1	13.7		
Probe 3	16	0	1	2.5d	10d	20	80	80	620	114.3	14.2		
Probe 4	16	0	1	2.5d	10d	20	80	80	620	126.0			15.7
Probe 5	16	0	1	2.5d	10d	20	80	80	620	121.9	15.2		
Mittelwert	16.0									117.2	14.3		15.7

	Gewinde- stange	Last- winkel	Anzahl	Rand- abstand	Einklebe- länge	Bohrloch- durch- messer	b	h	l	F_{\max}	Auszieh- festigkeit $f_{k1,mean}$	Auszieh- festigkeit $f_{Aufspalten,1,mean}$	Auszieh- festigkeit $f_{Stahl,1,mean}$
BU-EG08-16-0	M	Grad	n	$a_{2,c}$	l_{ad}	$d+2$	mm	mm	mm	kN	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
Probe 1	16	0	1	2.5d	15d	20	80	80	780	146.0			12.2
Probe 2	16	0	1	2.5d	15d	20	80	80	780	140.7			11.6
Probe 3	16	0	1	2.5d	15d	20	80	80	780	143.8			12.0
Probe 4	16	0	1	2.5d	15d	20	80	80	780	142.1			11.8
Probe 5	16	0	1	2.5d	15d	20	80	80	780	141.9			11.8
Mittelwert	16									142.9			11.9

	Gewinde- stange	Last- winkel	Anzahl	Rand- abstand	Einklebe- länge	Bohrloch- durch- messer	b	h	l	F_{\max}	Auszieh- festigkeit $f_{k1,mean}$	Auszieh- festigkeit $f_{Aufspalten,1,mean}$	Auszieh- festigkeit $f_{Stahl,1,mean}$
BU-EG10-16-45	M	Grad	n	$a_{2,c}$	l_{ad}	$d+2$	mm	mm	mm	kN	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
Probe 1	16	45	1	2.5d	10d	20	80	160	240	134.1	16.9		
Probe 2	16	45	1	2.5d	10d	20	80	160	240	129.8	16.2		
Probe 3	16	45	1	2.5d	10d	20	80	160	240	129.6	16.2		
Probe 4	16	45	1	2.5d	10d	20	80	160	240	135.8	16.6		
Probe 5	16	45	1	2.5d	10d	20	80	160	240	134.6	16.4		
Mittelwert	16									132.8	16.5		

BU-EG11-16-45	Gewinde- stange	Last- winkel	Anzahl	Rand- abstand	Einklebe- länge	Bohrloch- durch- messer	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>l</i>	F_{\max}	Auszieh- festigkeit $f_{k1,mean}$	Auszieh- festigkeit $f_{Aufspalten,1,mean}$	Auszieh- festigkeit $f_{Stahl,1,mean}$
	M	Grad	<i>n</i>	$a_{2,c}$	l_{ad}	$d+4$	mm	mm	mm	N	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
Probe 1	16	45	1	2.5d	15d	20	80	165	360	138.9			11.6
Probe 2	16	45	1	2.5d	15d	20	80	165	360	142.2			11.8
Probe 3	16	45	1	2.5d	15d	20	80	165	360	142.4			12.1
Probe 4	16	45	1	2.5d	15d	20	80	165	360	138.0			11.4
Probe 5	16	45	1	2.5d	15d	20	80	165	360	142.1			11.9
Mittelwert	16									140.7			11.8

BU-EG13-16-90	Gewinde- stange	Last- winkel	Anzahl	Rand- abstand	Einklebe- länge	Bohrloch- durch- messer	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>l</i>	F_{\max}	Auszieh- festigkeit $f_{k1,mean}$	Auszieh- festigkeit $f_{Aufspalten,1,mean}$	Auszieh- festigkeit $f_{Stahl,1,mean}$
	M	Grad	<i>n</i>	$a_{2,c}$	l_{ad}	$d+2$	mm	mm	mm	kN	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
Probe 1	16	90	1	2.5d	10d	20	80	235	240	135.5	17.2		
Probe 2	16	90	1	2.5d	10d	20	80	235	240	133.1	16.8		
Probe 3	16	90	1	2.5d	10d	20	80	235	240	140.8	18.0		
Probe 4	16	90	1	2.5d	10d	20	80	235	240	140.5	17.8		
Probe 5	16	90	1	2.5d	10d	20	80	235	240	135.1	17.2		
Mittelwert	16									137.0	17.4		

BU-EG14-16-90	Gewinde- stange	Last- winkel	Anzahl	Rand- abstand	Einklebe- länge	Bohrloch- durch- messer	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>l</i>	F_{\max}	Auszieh- festigkeit $f_{k1,mean}$	Auszieh- festigkeit $f_{Aufspalten,1,mean}$	Auszieh- festigkeit $f_{Stahl,1,mean}$
	M	Grad	<i>n</i>	$a_{2,c}$	l_{ad}	$d+2$	mm	mm	mm	kN	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
Probe 1	16	90	1	2.5d	15d	20	80	240	360	139.8			11.4
Probe 2	16	90	1	2.5d	15d	20	80	240	360	142.8			11.7
Probe 3	16	90	1	2.5d	15d	20	80	240	360	143.4			12.0
Probe 4	16	90	1	2.5d	15d	20	80	240	360	145.4			12.0
Probe 5	16	90	1	2.5d	15d	20	80	240	360	136.9			11.2
Mittelwert	16									141.7			11.6

BU-EG16-20-0	Gewinde- stange	Last- winkel	Anzahl	Rand- abstand	Einklebe- länge	Bohrloch- durch- messer	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>l</i>	F_{\max}	Auszieh- festigkeit $f_{k1,mean}$	Auszieh- festigkeit $f_{Aufspalten,1,mean}$	Auszieh- festigkeit $f_{Stahl,1,mean}$
	M	Grad	<i>n</i>	$a_{2,c}$	l_{ad}	$d+2$	mm	mm	mm	kN	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
Probe 1	20	0	1	2.5d	10d	24	100	100	700	190.2	15.1		
Probe 2	20	0	1	2.5d	10d	24	100	100	700	156.3		12.6	
Probe 3	20	0	1	2.5d	10d	24	100	100	700	138.3		10.6	
Probe 4	20	0	1	2.5d	10d	24	100	100	700	202.7	16.4		
Probe 5	20	0	1	2.5d	10d	24	100	100	700	191.2	14.2		
Mittelwert	20									175.7	15.2	11.6	

BU-EG18-20-90	Gewinde- stange	Last- winkel	Anzahl	Rand- abstand	Einklebe- länge	Bohrloch- durch- messer	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>l</i>	F_{\max}	Auszieh- festigkeit $f_{k1,mean}$	Auszieh- festigkeit $f_{Aufspalten,1,mean}$	Auszieh- festigkeit $f_{Stahl,1,mean}$
	M	Grad	<i>n</i>	$a_{2,c}$	l_{ad}	$d+2$	mm	mm	mm	kN	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
Probe 1	20	90	1	2.5d	10d	24	100	285	300	212.1	16.9		
Probe 2	20	90	1	2.5d	10d	24	100	285	300	206.0	16.3		
Probe 3	20	90	1	2.5d	10d	24	100	285	300	208.4	16.8		
Probe 4	20	90	1	2.5d	10d	24	100	285	300	208.1	16.7		
Probe 5	20	90	1	2.5d	10d	24	100	285	300	206.3	16.7		
Mittelwert	20									208.2	16.7		

BU-EG20-16-0	Gewinde- stange	Last- winkel	Anzahl	Rand- abstand	Einklebe- länge	Bohrloch- durch- messer	b	h	l	F_{\max}	Auszieh- festigkeit $f_{k1,mean}$	Auszieh- festigkeit $f_{Aufspalten,1,mean}$	Auszieh- festigkeit $f_{Stahl,1,mean}$
	M	Grad	n	$a_{2,c}$	l_{ad}	$d+2$	mm	mm	mm	kN	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
Probe 1	16	0	1	1.5d	15d	20	48	48	780	134.5		11.1	
Probe 2	16	0	1	1.5d	15d	20	48	48	780	116.2		9.6	
Probe 3	16	0	1	1.5d	15d	20	48	48	780	138.8		11.5	
Probe 4	16	0	1	1.5d	15d	20	48	48	780	137.5		11.2	
Probe 5	16	0	1	1.5d	15d	20	48	48	780	130.2		10.6	
Mittelwert	16									131.4		10.8	

BU-EG21-16-0	Gewinde- stange	Last- winkel	Anzahl	Rand- abstand	Einklebe- länge	Bohrloch- durch- messer	b	h	l	F_{\max}	Auszieh- festigkeit $f_{k1,mean}$		Auszieh- festigkeit $f_{Aufspalten,1,mean}$
	M	Grad	n	$a_{2,c}$	l_{ad}	$d+2$	mm	mm	mm	kN	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
Probe 1	16	0	1	1.5d	10d	20	48	48	620	103.9			13.1
Probe 2	16	0	1	1.5d	10d	20	48	48	620	105.6			13.3
Probe 3	16	0	1	1.5d	10d	20	48	48	620	110.3			13.8
Probe 4	16	0	1	1.5d	10d	20	48	48	620	99.2			12.5
Probe 5	16	0	1	1.5d	10d	20	48	48	620	114.7			14.5
Mittelwert	16									106.7			13.4

BU-EG22-16-0	Gewinde- stange	Last- winkel	Anzahl	Rand- abstand	Einklebe- länge	Bohrloch- durch- messer	b	h	l	F_{\max}	Auszieh- festigkeit $f_{k1,mean}$	Auszieh- festigkeit $f_{Aufspalten,1,mean}$	Auszieh- festigkeit $f_{Stahl,1,mean}$
	M	Grad	n	$a_{2,c}$	l_{ad}	$d+2$	mm	mm	mm	kN	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
Probe 1	16	0	1	3.5d	15d	20	112	112	780	141.2	11.8		
Probe 2	16	0	1	3.5d	15d	20	112	112	780	137.2	11.7		
Probe 3	16	0	1	3.5d	15d	20	112	112	780	146.5			12.4
Probe 4	16	0	1	3.5d	15d	20	112	112	780	142.0			11.9
Probe 5	16	0	1	3.5d	15d	20	112	112	780	143.0			12.1
Mittelwert	12									142.0	11.7		12.1

BU-EG23-16-90	Gewinde- stange	Last- winkel	Anzahl	Rand- abstand	Einklebe- länge	Bohrloch- durch- messer	b	h	l	F_{\max}	Auszieh- festigkeit $f_{k1,mean}$	Auszieh- festigkeit $f_{Aufspalten,1,mean}$	Auszieh- festigkeit $f_{Stahl,1,mean}$
	M	Grad	n	$a_{2,c}$	l_{ad}	$d+2$	mm	mm	mm	kN	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
Probe 1	16	90	1	1.5d	10d	20	48	385	240	134.8	17.0		
Probe 2	16	90	1	1.5d	10d	20	48	385	240	129.8	16.6		
Probe 3	16	90	1	1.5d	10d	20	48	385	240	126.1	16.2		
Probe 4	16	90	1	1.5d	10d	20	48	385	240	137.9	17.4		
Probe 5	16	90	1	1.5d	10d	20	48	385	240	142.9	17.8		
Mittelwert	16									134.3	17.0		

BU-EG25-16-90	Gewinde- stange	Last- winkel	Anzahl	Rand- abstand	Einklebe- länge	Bohrloch- durch- messer	b	h	l	F_{\max}	Auszieh- festigkeit $f_{k1,mean}$	Auszieh- festigkeit $f_{Aufspalten,1,mean}$	Auszieh- festigkeit $f_{Stahl,1,mean}$
	M	Grad	n	$a_{2,c}$	l_{ad}	$d+2$	mm	mm	mm	kN	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
Probe 1	16	90	1	3.5d	10d	20	112	170	240	136.6	17.4		
Probe 2	16	90	1	3.5d	10d	20	112	170	240	124.7	15.5		
Probe 3	16	90	1	3.5d	10d	20	112	170	240	128.4	16.3		
Probe 4	16	90	1	3.5d	10d	20	112	170	240	137.0	17.0		
Probe 5	16	90	1	3.5d	10d	20	112	170	240	138.4	16.7		
Mittelwert	16									133.0	16.6		

BU-EG26-16-0	Gewinde- stange	Last- winkel	Anzahl	Rand- abstand	Einklebe- länge	Bohrloch- durch- messer	b	h	l	F_{\max}	Auszieh- festigkeit $f_{k1,mean}$	Auszieh- festigkeit $f_{Aufspalten,1,mean}$	Auszieh- festigkeit $f_{Stahl,1,mean}$
	M	Grad	n	$a_{2,c}$	l_{ad}	$d+2$	mm	mm	mm	kN	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
Probe 1	16	0	4	2.5d	8d	20	160	160	556	372.3	14.5	14.5	
Probe 2	16	0	4	2.5d	8d	20	160	160	556	335.7	13.1	13.1	
Probe 3	16	0	4	2.5d	8d	20	160	160	556	362.9	14.2	14.2	
Mittelwert	16									357.0	14.0	14.0	

BU-EG27-16-0	Gewindestange	Lastwinkel	Anzahl	Randabstand	Einklebelänge	Bohrlochdurchmesser	b	h	l	F _{max}	Ausziehfestigkeit $f_{k1,mean}$	Ausziehfestigkeit $f_{Aufspalten,1,mean}$	Ausziehfestigkeit $f_{Stahl,1,mean}$
	M	Grad	n	$a_{2,c}$	l_{ad}	d+2	mm	mm	mm	kN	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
Probe 1	16	0	4	2.5d	10d+5d	20	160	160		441.9	13.4		
Probe 2	16	0	4	2.5d	10d+5d	20	160	160		427.2	12.8		
Probe 3	16	0	4	2.5d	10d+5d	20	160	160		448.6	13.6		
Mittelwert	16									439.2	13.3		

BU-EG28-16-0	Gewindestange	Lastwinkel	Anzahl	Randabstand	Einklebelänge	Bohrlochdurchmesser	b	h	l	F _{max}	Ausziehfestigkeit $f_{k1,mean}$	Ausziehfestigkeit $f_{Aufspalten,1,mean}$	Ausziehfestigkeit $f_{Stahl,1,mean}$
	M	Grad	n	$a_{2,c}$	l_{ad}	d+2	mm	mm	mm	kN	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
Probe 1													
Probe 2	16	0	4	2.0d	10d+5d	20	128	128		471.2	14.5		
Probe 3	16	0	4	2.0d	10d+5d	20	128	128		445.1	13.6		
Mittelwert	16									458.1	14.0		

BU-EG29-16-0	Gewindestange	Lastwinkel	Anzahl	Randabstand	Einklebelänge	Bohrlochdurchmesser	b	h	l	F _{max}	Ausziehfestigkeit $f_{k1,mean}$	Ausziehfestigkeit $f_{Aufspalten,1,mean}$	Ausziehfestigkeit $f_{Stahl,1,mean}$
	M	Grad	n	$a_{2,c}$	l_{ad}	d+2	mm	mm	mm	kN	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
Probe 1	16	0	4	1.75d	10d+5d	20	112	112		424.3	12.8		
Probe 2	16	0	4	1.75d	10d+5d	20	112	112		466.0	14.5		
Probe 3	16	0	4	1.75d	10d+5d	20	112	112					
Mittelwert	16									445.1	13.6		

BU-EG34-16-90	Gewindestange	Lastwinkel	Anzahl	Randabstand	Einklebelänge	Bohrlochdurchmesser	b	h	l	F _{max}	Ausziehfestigkeit $f_{k1,mean}$	Ausziehfestigkeit $f_{Aufspalten,1,mean}$	Ausziehfestigkeit $f_{Stahl,1,mean}$
	M	Grad	n	$a_{2,c}$	l_{ad}	d+2	mm	mm	mm	kN	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
Probe 1	16	90	4	2.5d	10d	20	160	160		425.1	13.2		
Probe 2	16	90	4	2.5d	10d	20	160	160		398.1	12.4		
Probe 3	16	90	4	2.5d	10d	20	160	160		396.7	12.3		
Mittelwert	16									406.7	12.6		

BU-EG35-16-90	Gewindestange	Lastwinkel	Anzahl	Randabstand	Einklebelänge	Bohrlochdurchmesser	b	h	l	F _{max}	Ausziehfestigkeit $f_{k1,mean}$	Ausziehfestigkeit $f_{Aufspalten,1,mean}$	Ausziehfestigkeit $f_{Stahl,1,mean}$
	M	Grad	n	$a_{2,c}$	l_{ad}	d+2	mm	mm	mm	kN	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
Probe 1	16	90	4	2.0d	10d	20	128	128		375.5	11.7		
Probe 2	16	90	4	2.0d	10d	20	128	128		372.8	11.6		
Probe 3	16	90	4	2.0d	10d	20	128	128		348.2	10.9		
Mittelwert	16									365.5	11.4		

BU-EG36-16-90	Gewindestange	Lastwinkel	Anzahl	Randabstand	Einklebelänge	Bohrlochdurchmesser	b	h	l	F _{max}	Ausziehfestigkeit $f_{k1,mean}$	Ausziehfestigkeit $f_{Aufspalten,1,mean}$	Ausziehfestigkeit $f_{Stahl,1,mean}$
	M	Grad	n	$a_{2,c}$	l_{ad}	d+2	mm	mm	mm	kN	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
Probe 1	16	90	4	1.75d	10d	20	108.8	108.8		330.8	10.3		
Probe 2	16	90	4	1.75d	10d	20	108.8	108.8		314.9	9.8		
Probe 3	16	90	4	1.75d	10d	20	108.8	108.8		337.0	10.5		
Mittelwert	16									327.5	10.2		

BU-EG42-16-0	Gewindestange	Lastwinkel	Anzahl	Randabstand	Einklebelänge	Bohrlochdurchmesser	b	h	l	F _{max}	Ausziehfestigkeit $f_{k1,mean}$	Ausziehfestigkeit $f_{Aufspalten,1,mean}$	Ausziehfestigkeit $f_{Stahl,1,mean}$
	M	Grad	n	$a_{2,c}$	l_{ad}	d+2	mm	mm	mm	kN	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
Probe 1	16	0	1	3.5d	10d	20	112	112	620	126.1	15.7		
Probe 2	16	0	1	3.5d	10d	20	112	112	620	132.3	16.5		
Probe 3	16	0	1	3.5d	10d	20	112	112	620	130.4	16.2		
Probe 4	16	0	1	3.5d	10d	20	112	112	620	140.8	17.4		
Probe 5	16	0	1	3.5d	10d	20	112	112	620	133.9	16.7		
Mittelwert	16	0								132.7	16.5		

BU-EG43-16-0	Gewinde- stange	Last- winkel	Anzahl	Rand- abstand	Einklebe- länge	Bohrloch- durch- messer	b	h	l	F_{\max}	Auszieh- festigkeit $f_{k1,mean}$	Auszieh- festigkeit $f_{Aufspalten,1,mean}$	Auszieh- festigkeit $f_{Stahl,1,mean}$
	M	Grad	n	$a_{2,c}$	l_{ad}	$d+2$	mm	mm	mm	kN	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
Probe 1	16	0	1	3.5d	8d	20	112	112	556	104.6	16.2		
Probe 2	16	0	1	3.5d	8d	20	112	112	556	108.6	16.9		
Probe 3	16	0	1	3.5d	8d	20	112	112	556	105.5	16.5		
Probe 4	16	0	1	3.5d	8d	20	112	112	556	110.4	17.1		
Probe 5	16	0	1	3.5d	8d	20	112	112	556	114.1	17.9		
Mittelwert	16									108.6	16.9		

BU-EG44-16-0	Gewinde- stange	Last- winkel	Anzahl	Rand- abstand	Einklebe- länge	Bohrloch- durch- messer	b	h	l	F_{\max}	Auszieh- festigkeit $f_{k1,mean}$	Auszieh- festigkeit $f_{Aufspalten,1,mean}$	Auszieh- festigkeit $f_{Stahl,1,mean}$
	M	Grad	n	$a_{2,c}$	l_{ad}	$d+2$	mm	mm	mm	kN	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
Probe 1	16	0	1	2.5d	8d	20	80	80	556	104.8	16.2	16.2	
Probe 2	16	0	1	2.5d	8d	20	80	80	556	91.7	14.2	14.2	
Probe 3	16	0	1	2.5d	8d	20	80	80	556	96.3	14.9		
Probe 4	16	0	1	2.5d	8d	20	80	80	556	94.6	14.8	14.8	
Probe 5	16	0	1	2.5d	8d	20	80	80	556	105.0	16.4	16.4	
Mittelwert	16									98.5	15.3	15.4	

BU-EG46-16-0	Gewinde- stange	Last- winkel	Anzahl	Rand- abstand	Einklebe- länge	Bohrloch- durch- messer	b	h	l	F_{\max}	Auszieh- festigkeit $f_{k1,mean}$	Auszieh- festigkeit $f_{Aufspalten,1,mean}$	Auszieh- festigkeit $f_{Stahl,1,mean}$
	M	Grad	n	$a_{2,c}$	l_{ad}	$d+2$	mm	mm	mm	kN	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
Probe 1	16	0	1	2.5d	10d	20	80	80	620	117.4		14.6	
Probe 2	16	0	1	2.5d	10d	20	80	80	620	140.3	17.6		
Probe 3	16	0	1	2.5d	10d	20	80	80	620	125.1	15.4	15.4	
Mittelwert	16									127.6	16.5	15.0	

M09-BU-16-0	Gewinde- stange	Last- winkel	Anzahl	Rand- abstand	Einklebe- länge	Bohrloch- durch- messer	b	h	l	F_{\max}	Auszieh- festigkeit $f_{k1,mean}$	Auszieh- festigkeit $f_{Aufspalten,1,mean}$	Auszieh- festigkeit $f_{Stahl,1,mean}$
	M	Grad	n	$a_{2,c}$	l_{ad}	$d+2$	mm	mm	mm	kN	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
Probe 1-kraft	16	0	1	2.5d	10d	18	80	80	620	112.0	14.0		
Probe 2-kraft	16	0	1	2.5d	10d	18	80	80	620	123.6	15.3		
Probe 3-kraft	16	0	1	2.5d	10d	18	80	80	620	112.2	13.9		
Probe 4	16	0	1	2.5d	10d	18	80	80	620	103.6	12.9		
Probe 5	16	0	1	2.5d	10d	18	80	80	620	112.4	14.0		
Mittelwert	16									112.8	14.0		

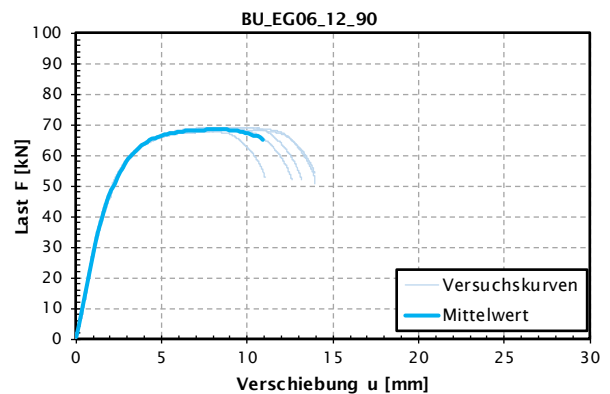
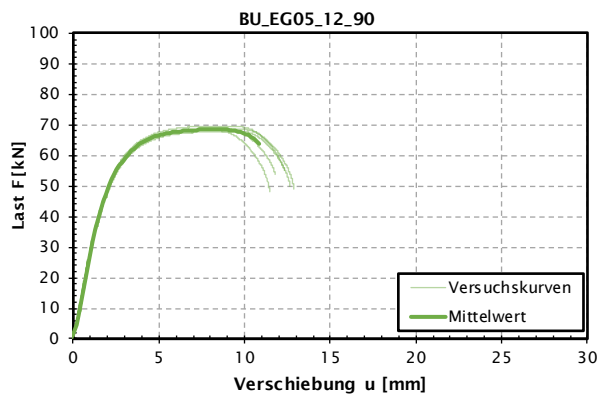
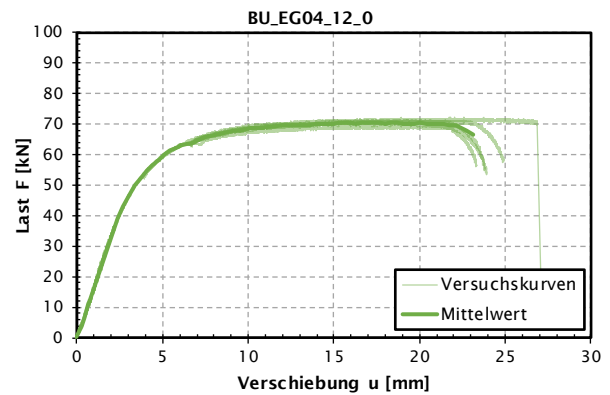
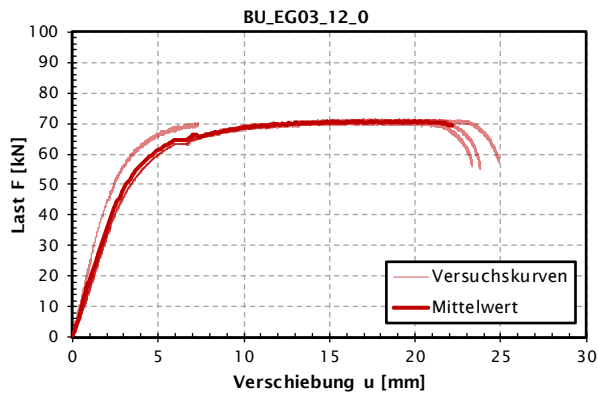
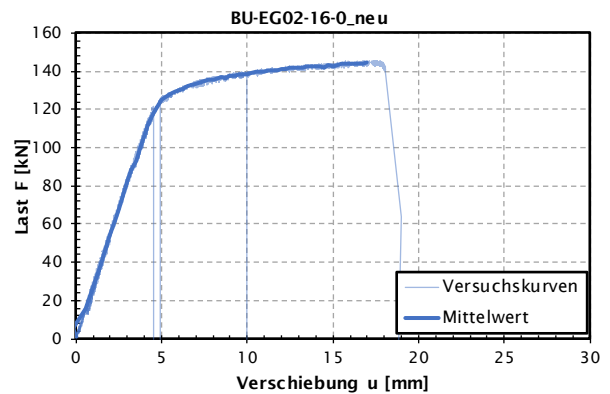
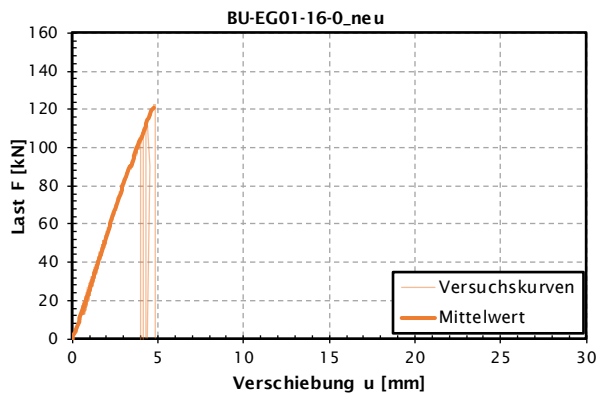
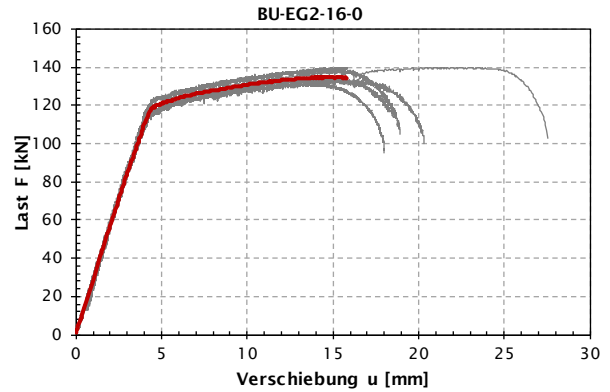
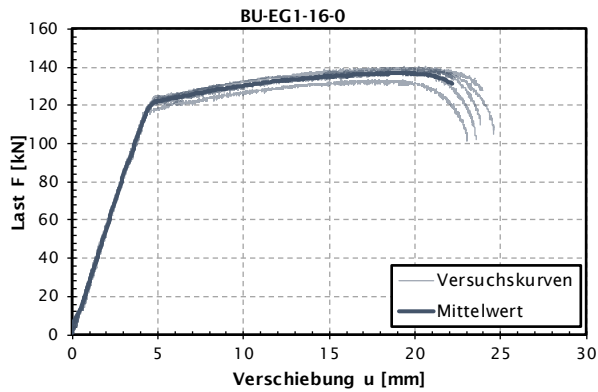
M10-BU-16-0	Gewinde- stange	Last- winkel	Anzahl	Rand- abstand	Einklebe- länge	Bohrloch- durch- messer	b	h	l	F_{\max}	Auszieh- festigkeit $f_{k1,mean}$	Auszieh- festigkeit $f_{Aufspalten,1,mean}$	Auszieh- festigkeit $f_{Stahl,1,mean}$
	M	Grad	n	$a_{2,c}$	l_{ad}	$d+2$	mm	mm	mm	kN	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
Probe 1	16	0	1	2.5d	10d	20	80	80	620	116.5	14.5		
Probe 2	16	0	1	2.5d	10d	20	80	80	620	113.8	14.1		
Probe 3	16	0	1	2.5d	10d	20	80	80	620	95.3			
Probe 4	16	0	1	2.5d	10d	20	80	80	620	115.8	14.4		
Probe 5	16	0	1	2.5d	10d	20	80	80	620	117.2	14.6		
Mittelwert	16									115.8	14.4		

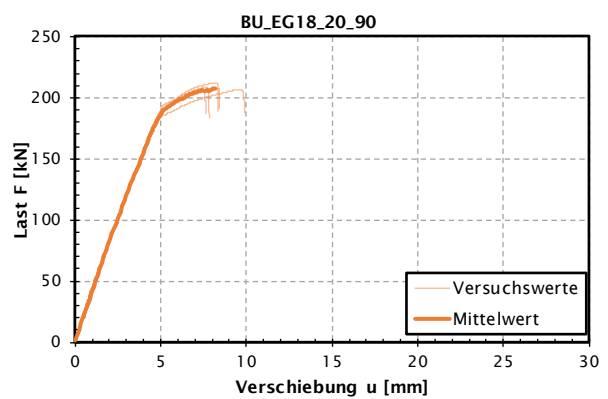
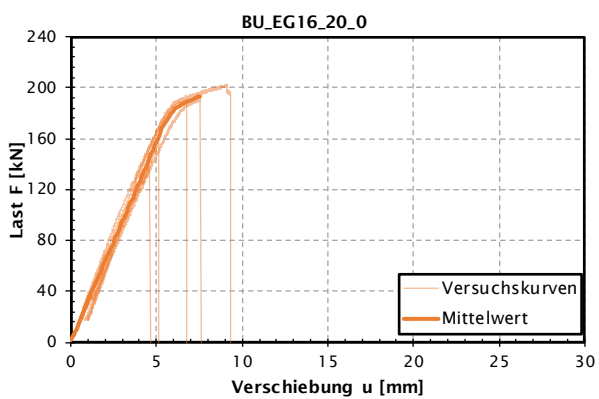
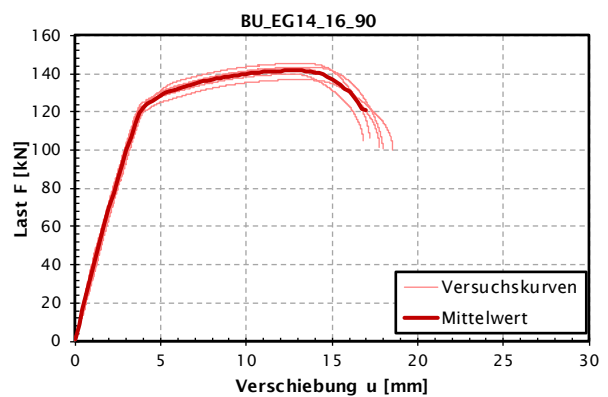
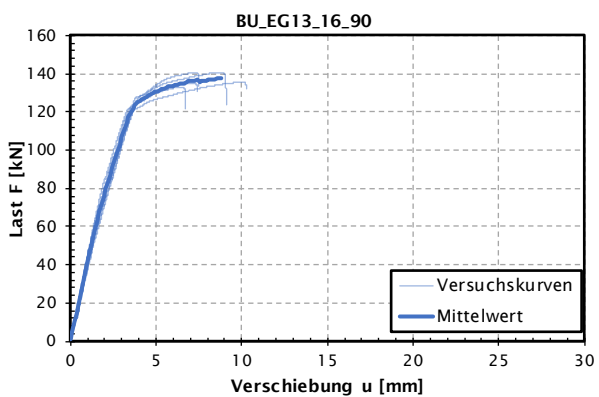
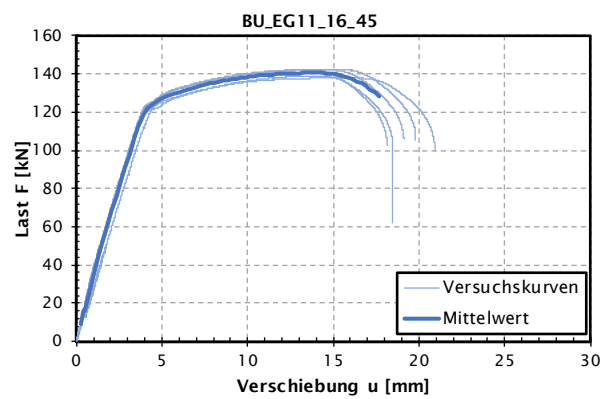
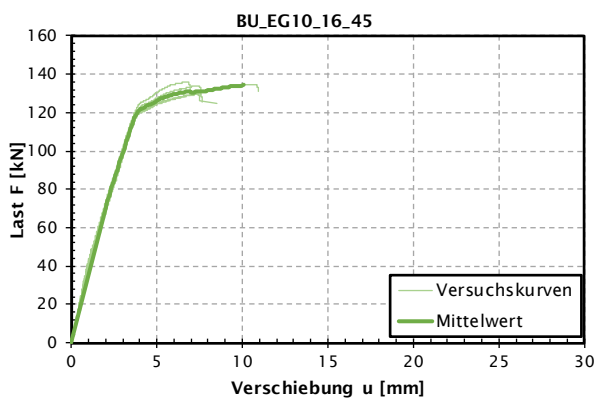
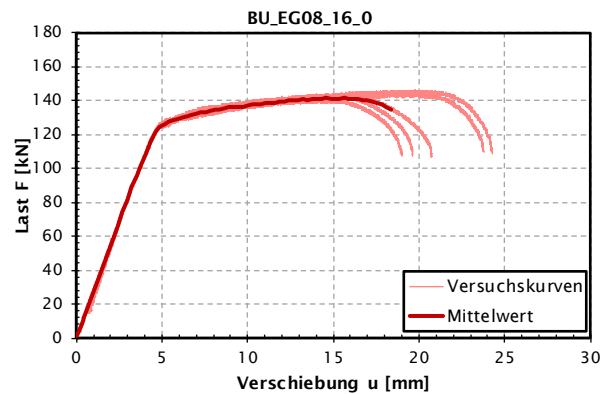
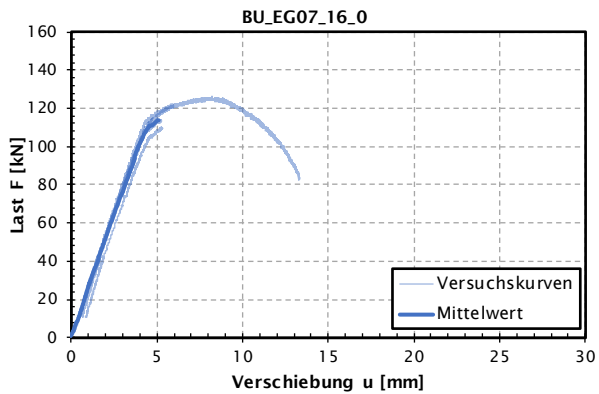
M13-BU-16-0	Gewinde- stange	Last- winkel	Anzahl	Rand- abstand	Einklebe- länge	Bohrloch- durch- messer	b	h	l	F_{\max}	Auszieh- festigkeit $f_{k1,mean}$	Auszieh- festigkeit $f_{Aufspalten,1,mean}$	Auszieh- festigkeit $f_{Stahl,1,mean}$
	M	Grad	n	$a_{2,c}$	l_{ad}	$d+2$	mm	mm	mm	kN	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
Probe 1	16	0	1	2.5d	10d + 5d	18	80	80	780	113.9	13.9		
Probe 2	16	0	1	2.5d	10d + 5d	18	80	80	780	116.2	14.2		
Probe 3	16	0	1	2.5d	10d + 5d	18	80	80	780	122.8	15.3		
Probe 4	16	0	1	2.5d	10d + 5d	18	80	80	780	115.9	14.7		
Mittelwert	16									117.2	14.5		

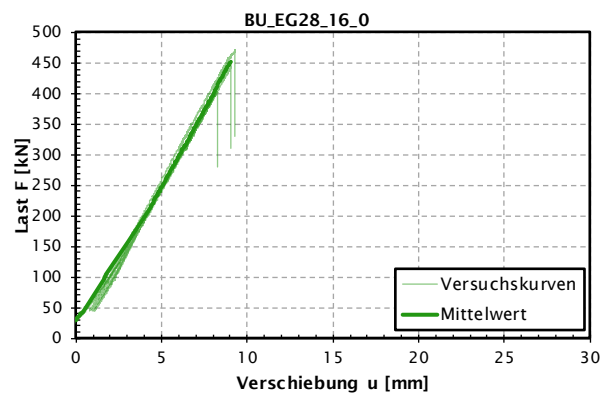
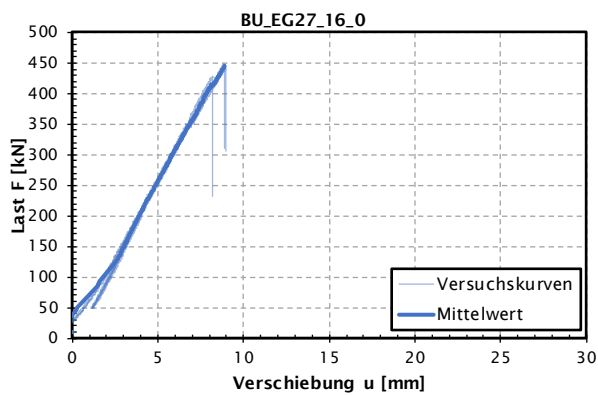
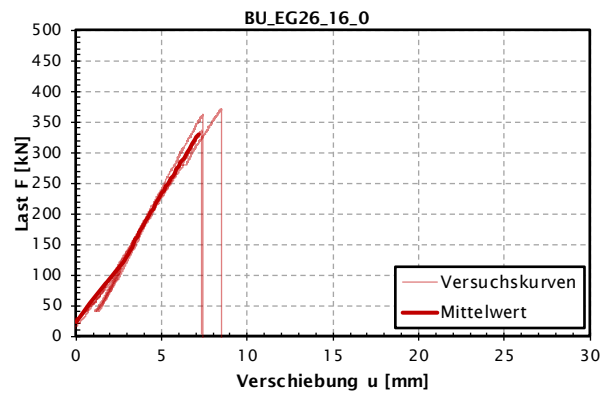
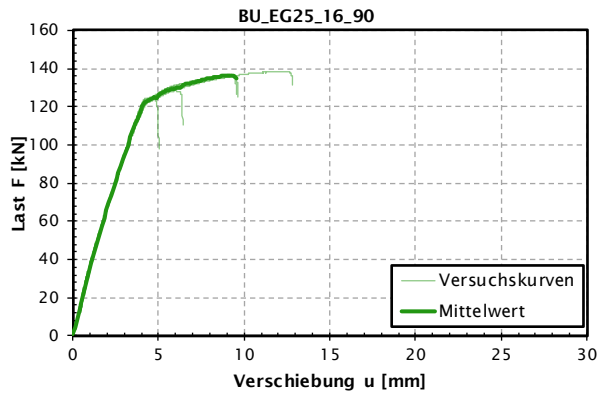
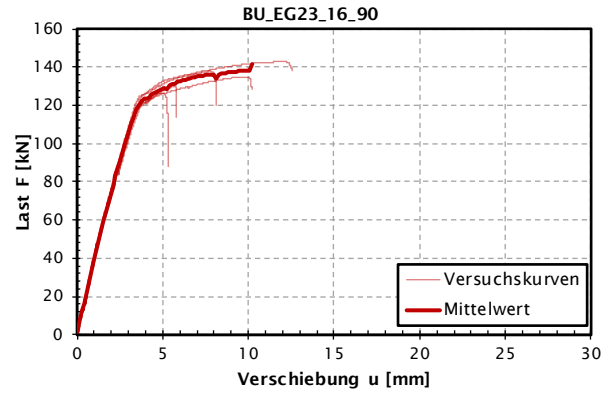
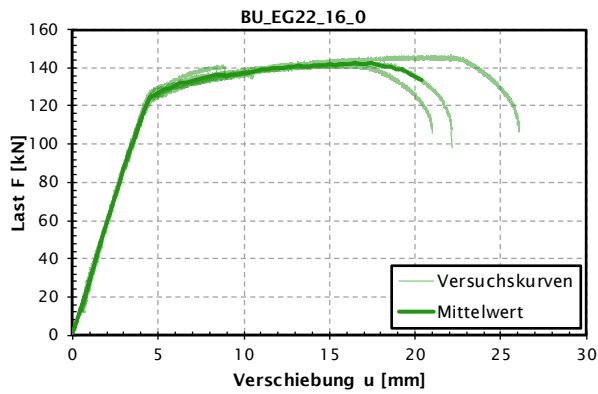
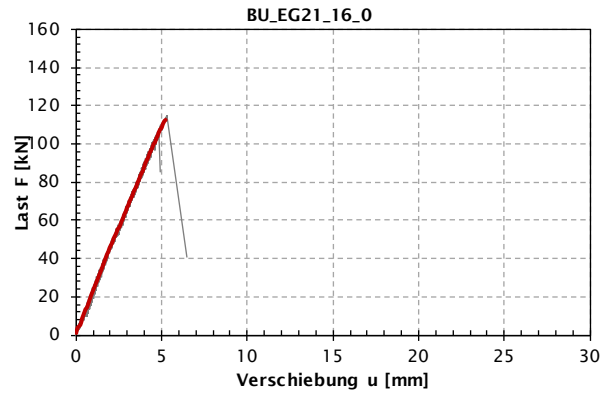
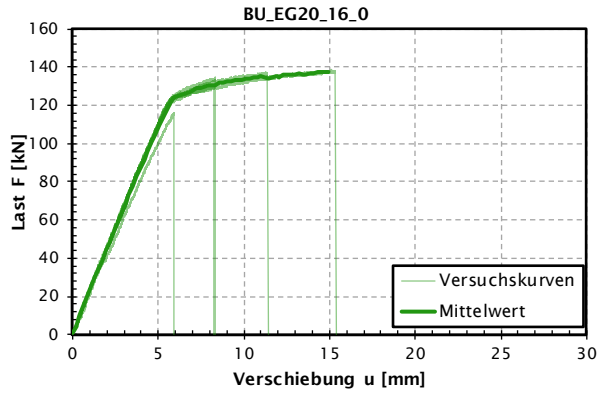
	Gewinde- stange	Last- winkel	Anzahl	Rand- abstand	Einklebe- länge	Bohrloch- durch- messer	b	h	l	F_{\max}	Auszieh- festigkeit $f_{k1,mean}$	Auszieh- festigkeit $f_{Aufspalten,1,mean}$	Auszieh- festigkeit $f_{Stahl,1,mean}$
M15-BU-16-0	M	Grad	n	$a_{2,c}$	l_{ad}	$d+2$	mm	mm	mm	kN	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
Probe 1	16	0	1	2.5d	10d + 5d	18	80	80	780	149.5	18.6		
Probe 2	16	0	1	2.5d	10d + 5d	18	80	80	780	155.8	19.4		
Probe 3	16	0	1	2.5d	10d + 5d	18	80	80	780	141.3	17.7		
Mittelwert	16									148.9	18.5		

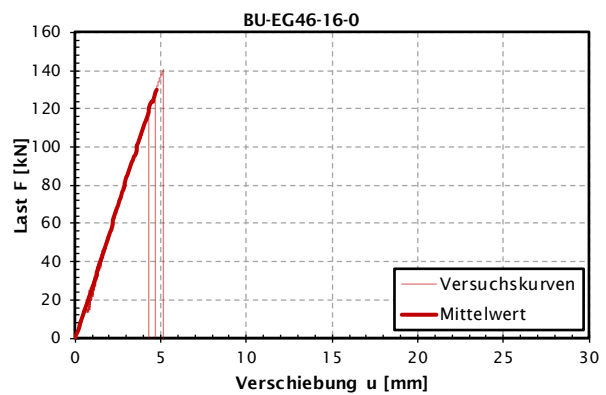
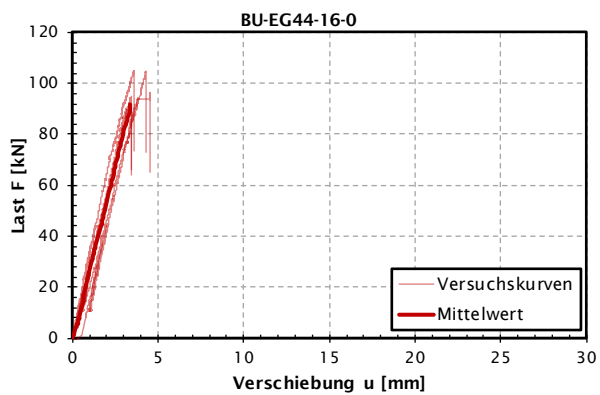
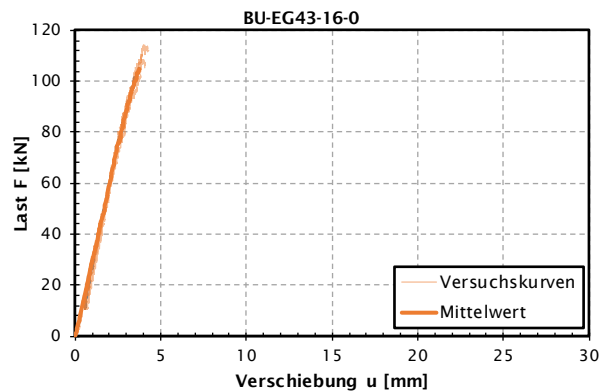
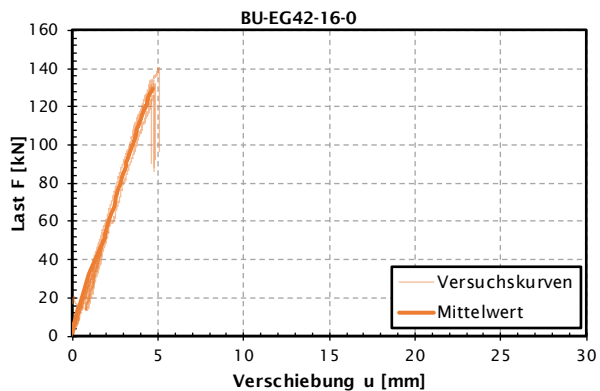
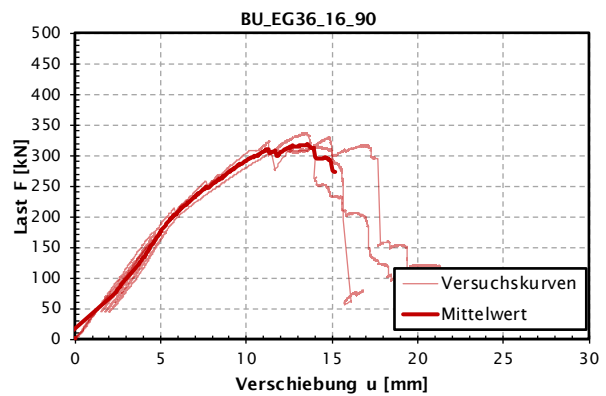
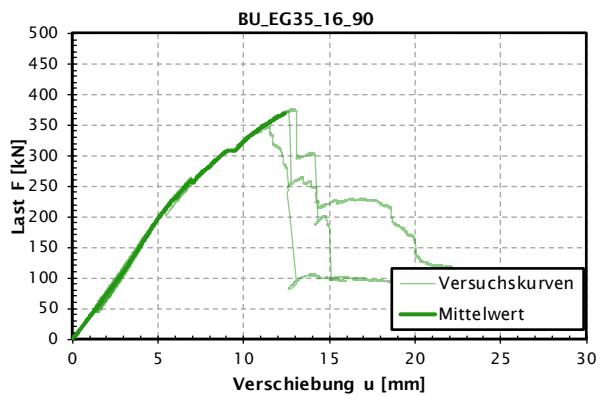
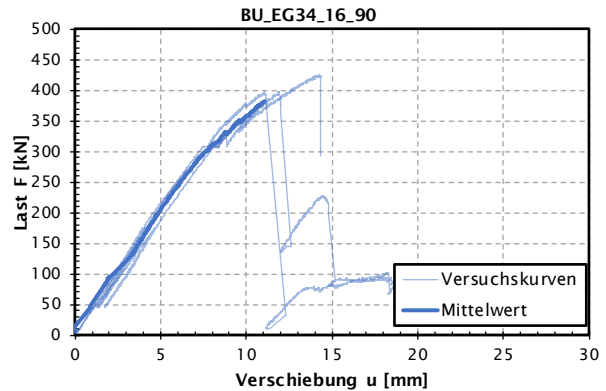
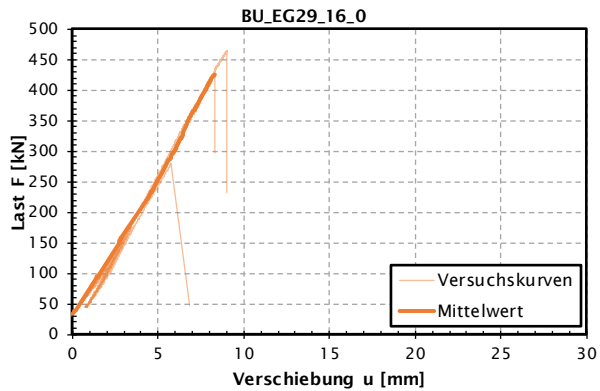
	Gewinde- stange	Last- winkel	Anzahl	Rand- abstand	Einklebe- länge	Bohrloch- durch- messer	b	h	l	F_{\max}	Auszieh- festigkeit $f_{k1,mean}$	Auszieh- festigkeit $f_{Aufspalten,1,mean}$	Auszieh- festigkeit $f_{Stahl,1,mean}$
M22-BU-16-0	M	Grad	n	$a_{2,c}$	l_{ad}	$d+2$	mm	mm	mm	kN	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
Probe 1	16	0	1	1.5d	10d + 5d	18	48	48	780	135.7	17.0		
Probe 2	16	0	1	1.5d	10d + 5d	18	48	48	780	128.4	15.9		
Probe 3	16	0	1	1.5d	10d + 5d	18	48	48	780	130.4	16.2		
Mittelwert	16									131.5	16.4		

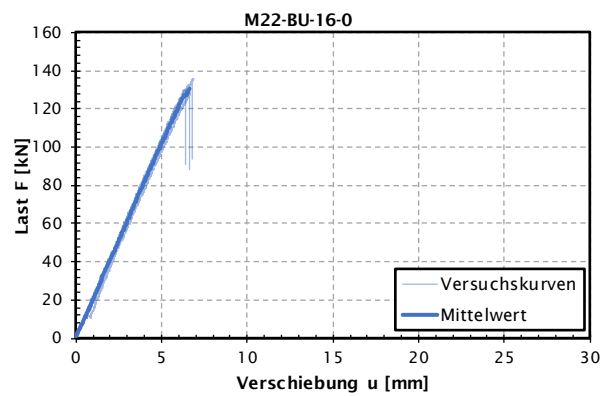
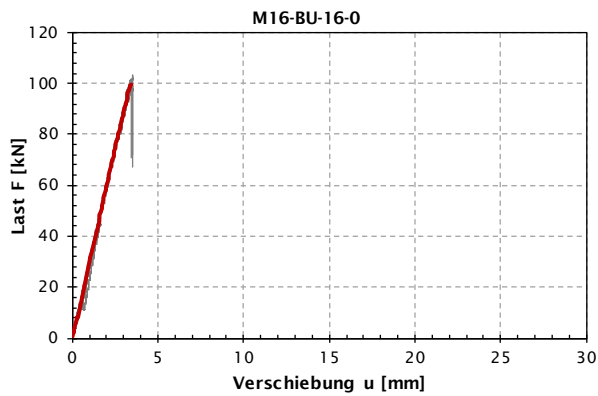
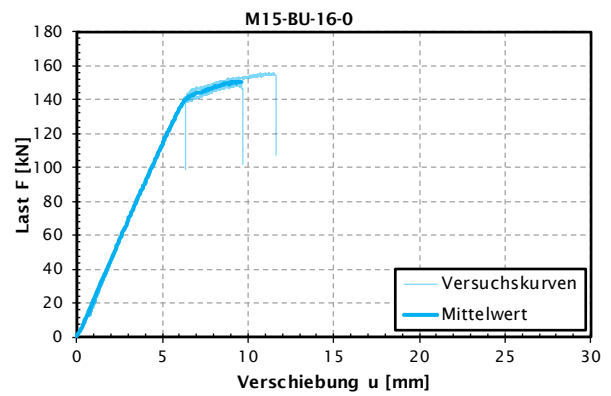
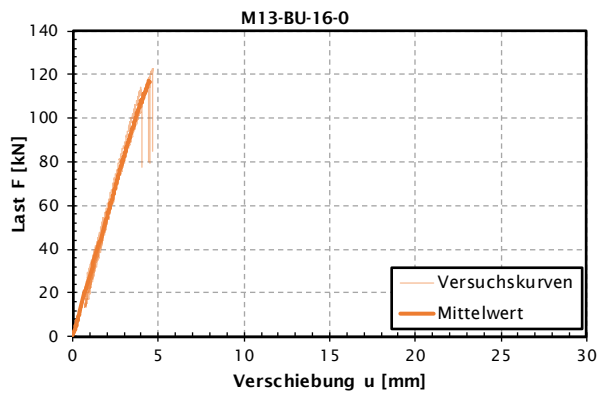
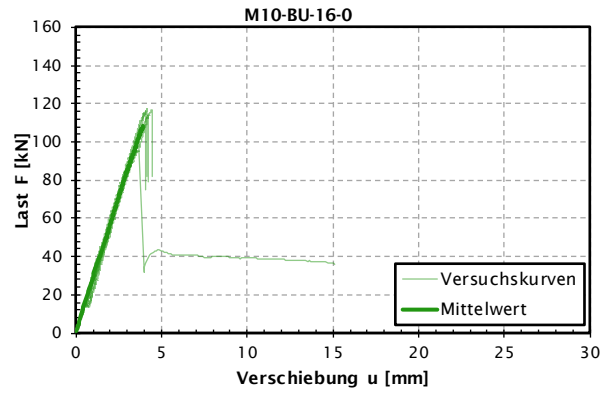
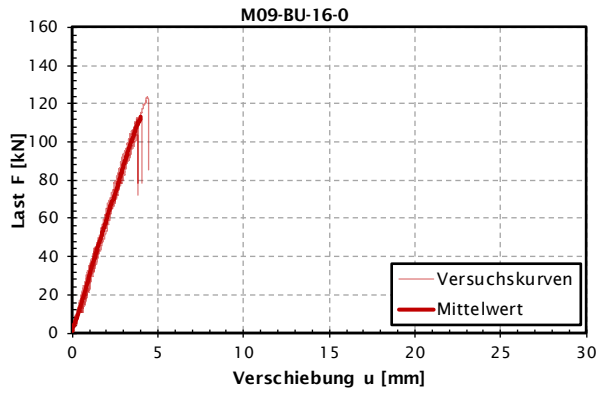
A.2 Last-Verschiebungskurven je Prüfserie







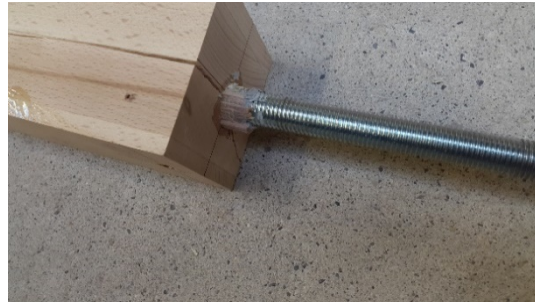




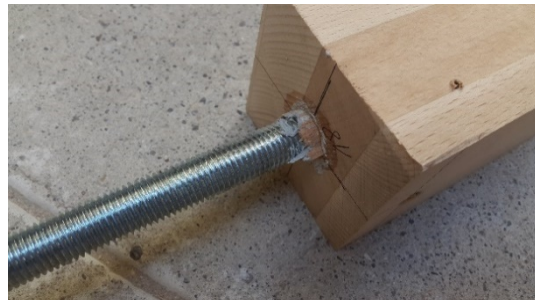
A.3 Versagensbilder

BU-EG01-16-0_neu

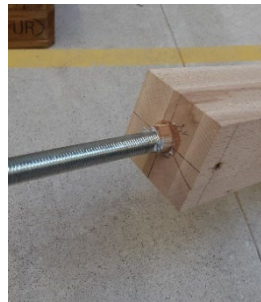
Probe 1



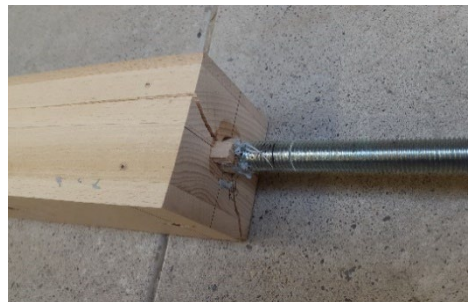
Probe 2



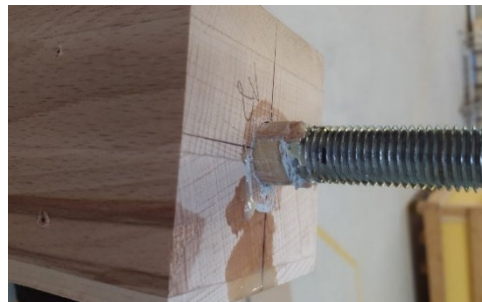
Probe 3



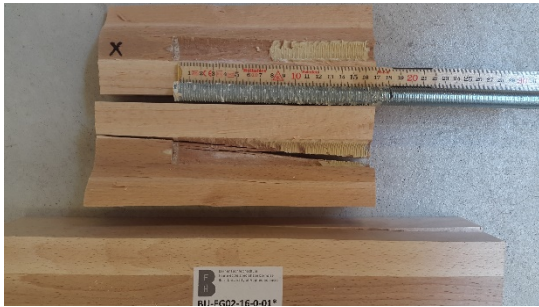
Probe 4



Probe 5



BU-EG02-16-0_neu
 Probe 1



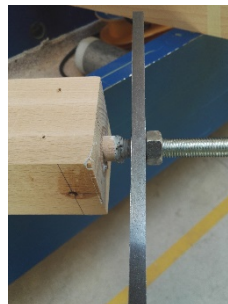
Probe 2



Probe 3



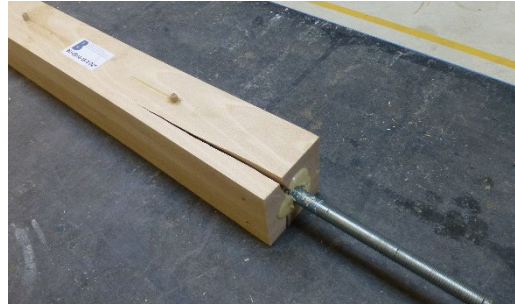
Probe 4



Probe 1a



Probe 2a



Probe 3a



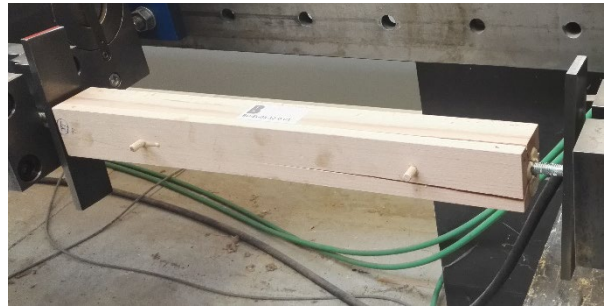
Probe 4a



Probe 5a



BU-EG03-12-0
 Probe 1



Probe 2



Probe 3



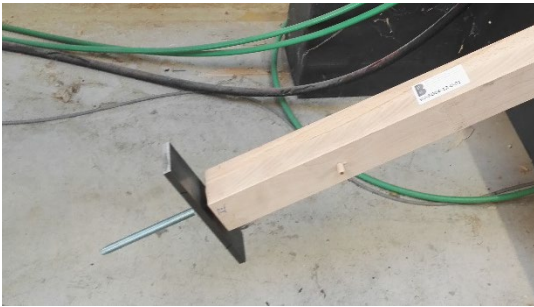
Probe 4



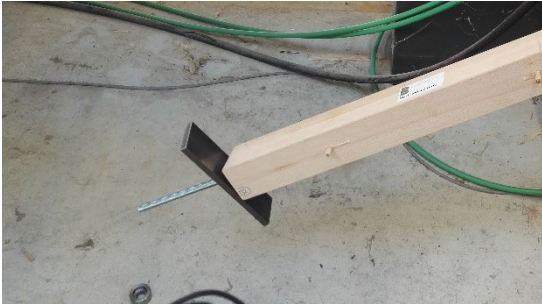
Probe 5



BU-EG04-12-0
 Probe 1



Probe 2



Probe 3



Probe 4



Probe 5



BU-EG05-12-90

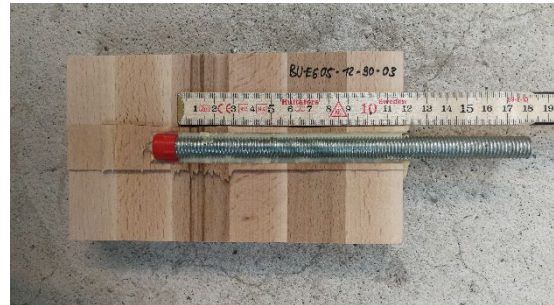
Probe 1



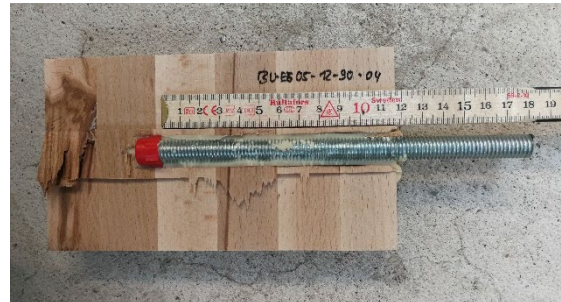
Probe 2



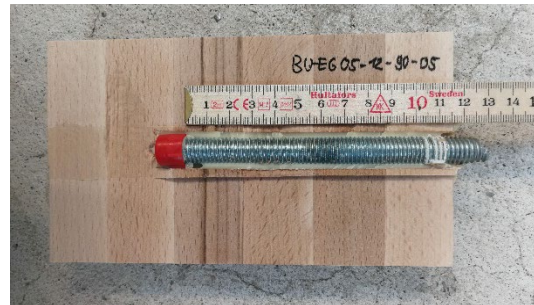
Probe 3



Probe 4



Probe 5



BU-EG06-12-90

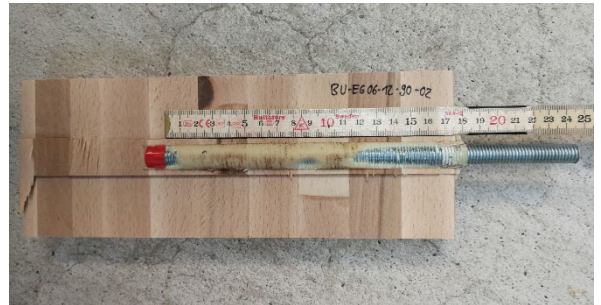
Probe 1



Probe 2



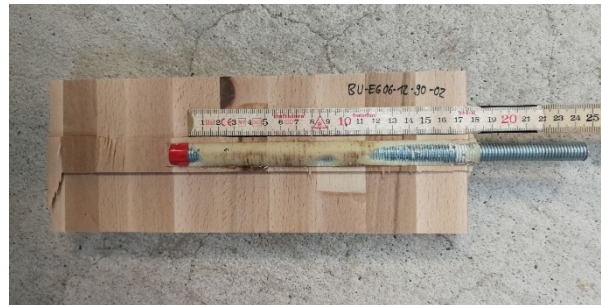
Probe 3



Probe 4



Probe 5



BU-EG07-16-0
Probe 1



Probe 2



Probe 3



Probe 4



Probe 5



BU-EG08-16-0

Probe 1



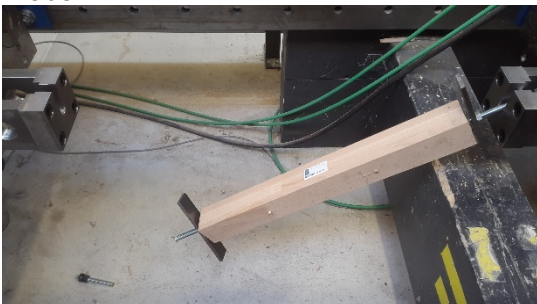
Probe 2



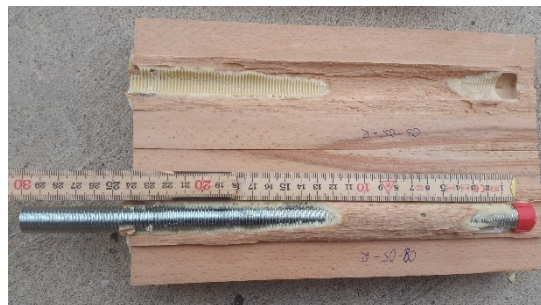
Probe 3



Probe 4



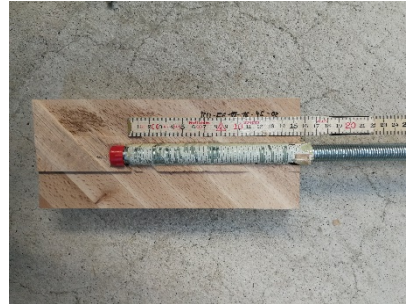
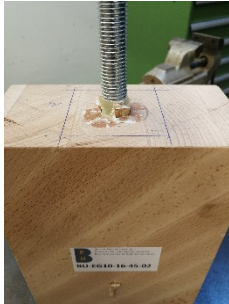
Probe 5



BU-EG10-16-45
Probe 1



Probe 2



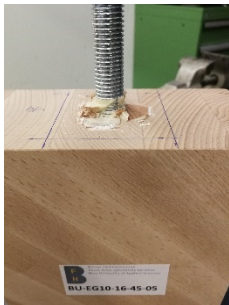
Probe 3



Probe 4

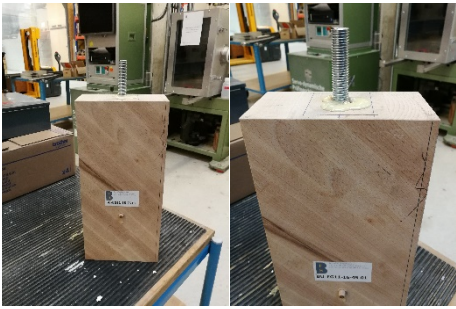


Probe 5



BU-EG11-16-45

Probe 1



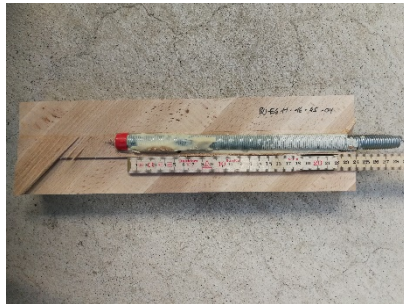
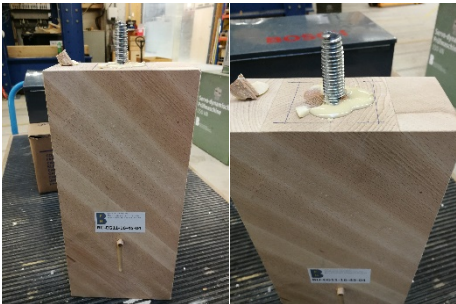
Probe 2



Probe 3



Probe 4

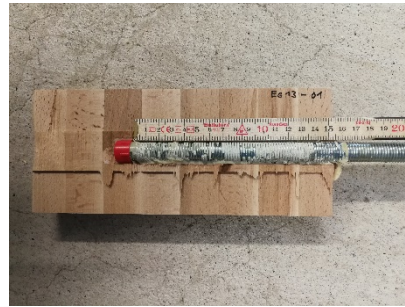
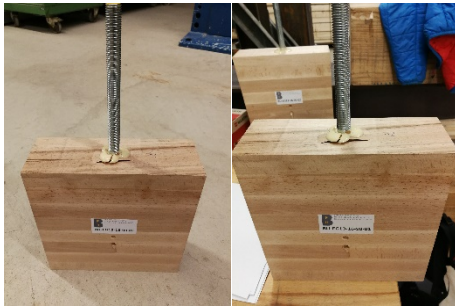


Probe 5

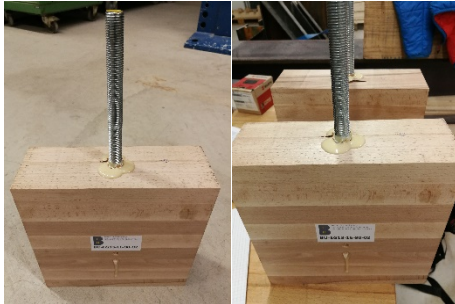


BU-EG13-16-90

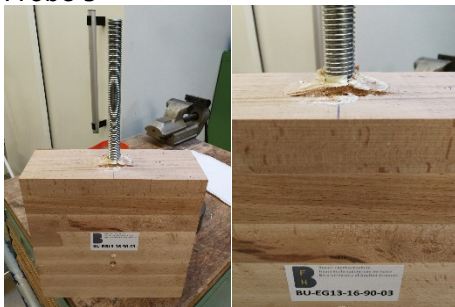
Probe 1



Probe 2



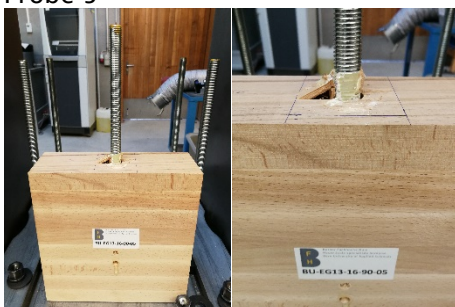
Probe 3



Probe 4

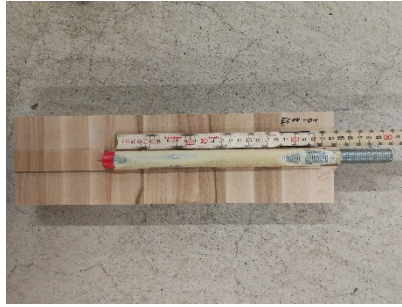


Probe 5

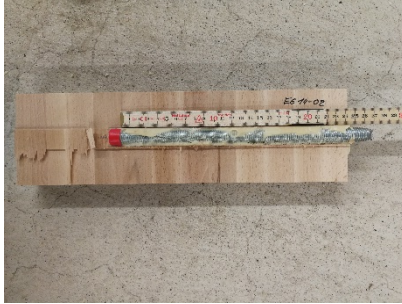


BU-EG14-16-90

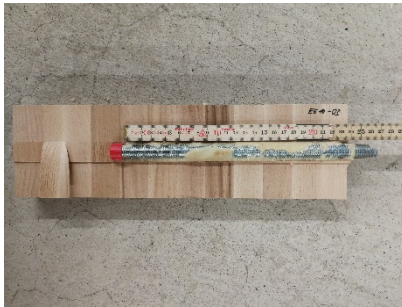
Probe 1



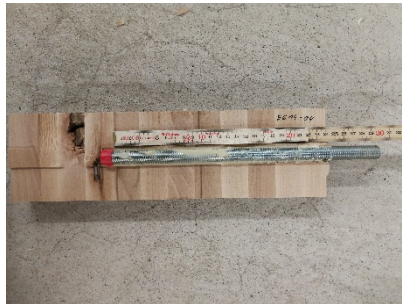
Probe 2



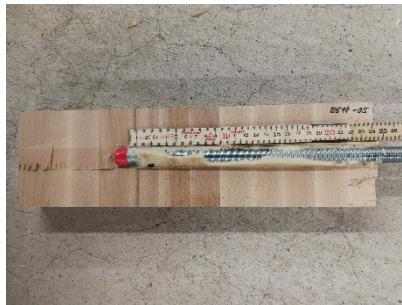
Probe 3



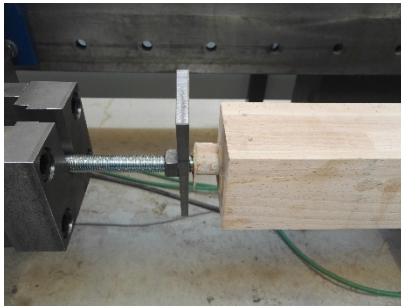
Probe 4



Probe 5



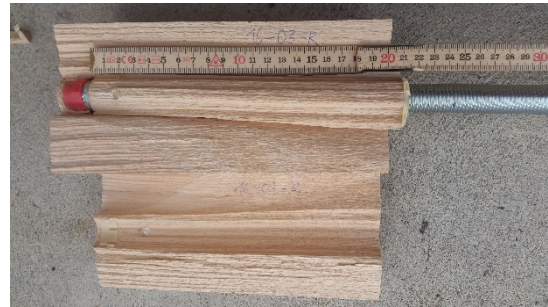
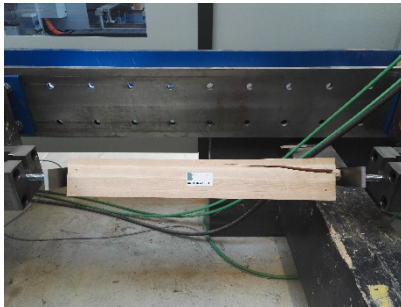
BU-EG-16-20-0
 Probe 1



Probe 2



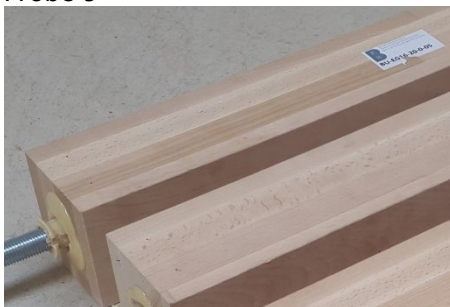
Probe 3



Probe 4

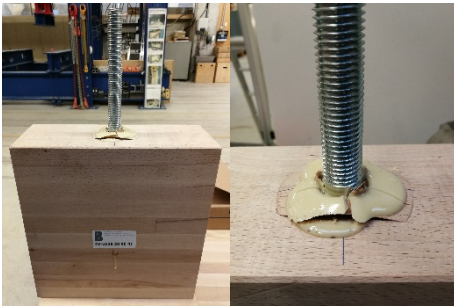


Probe 5

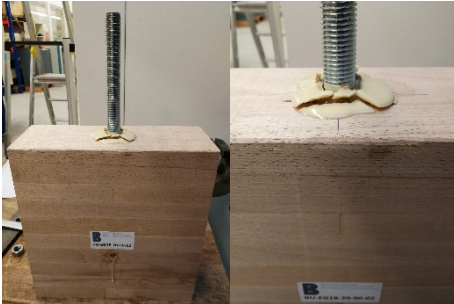


BU-EG18-20-90

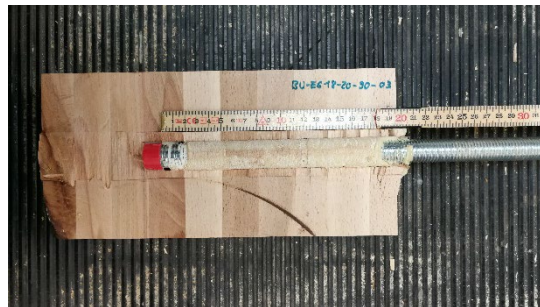
Probe 1



Probe 2



Probe 3



Probe 4



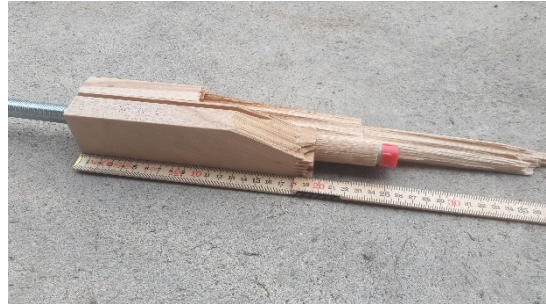
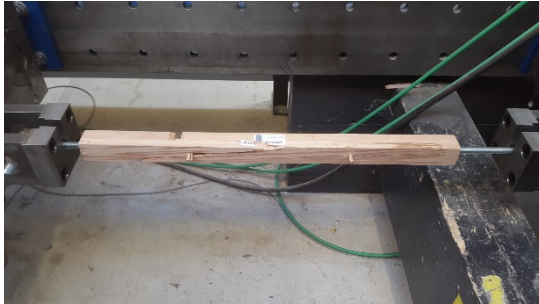
Probe 5



BU-EG20-16-0
 Probe 1



Probe 2



Probe 3



Probe 4

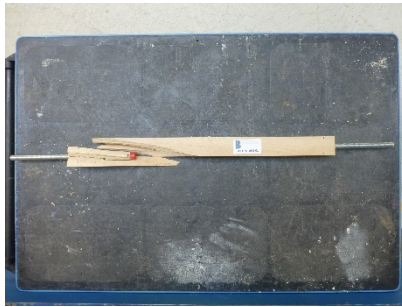
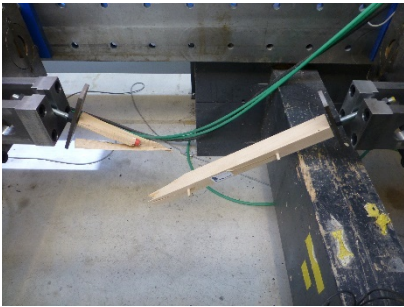


Probe 5

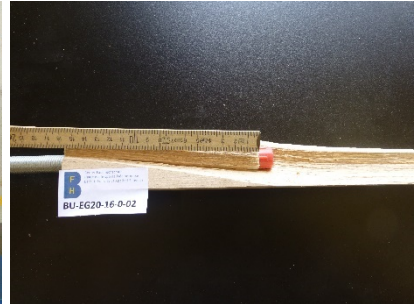
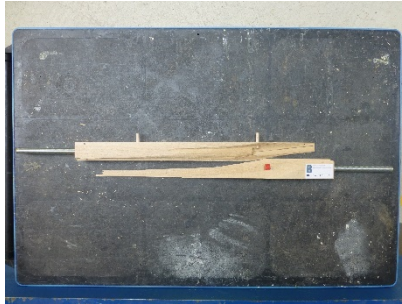
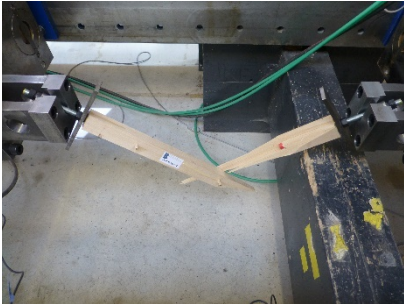


BU-EG21-16-0

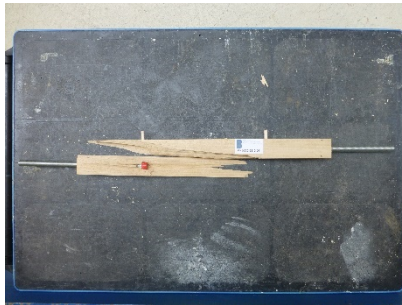
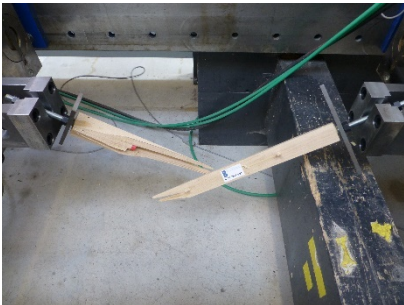
Probe 1



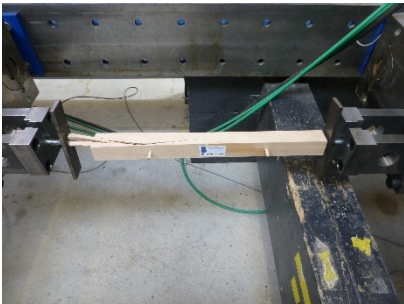
Probe 2



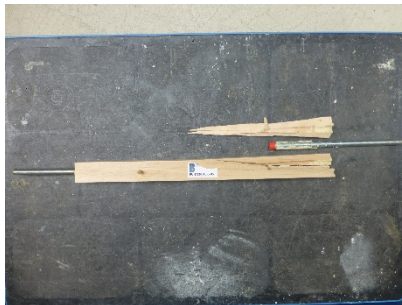
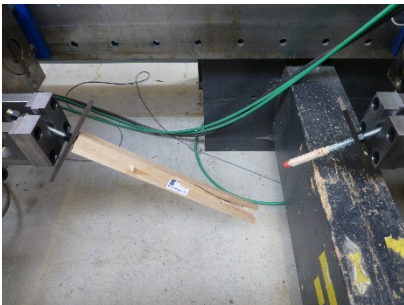
Probe 3



Probe 4



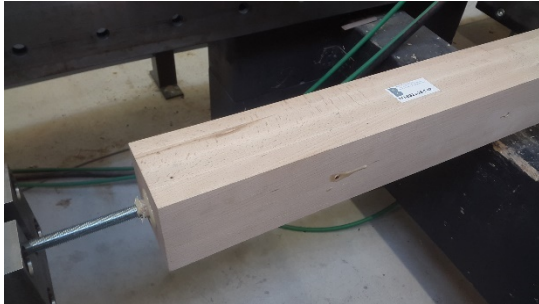
Probe 5



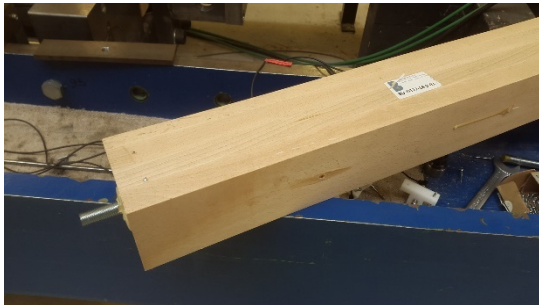
BU-EG22-16-0
 Probe 1



Probe 2



Probe 3



Probe 4

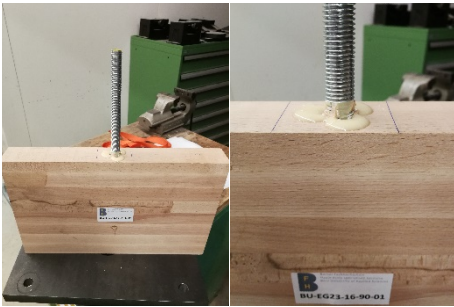


Probe 5

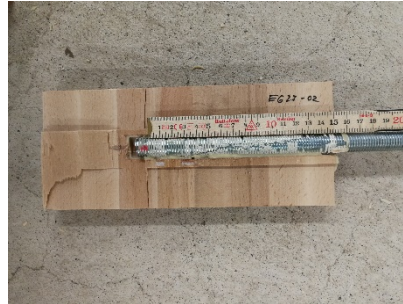
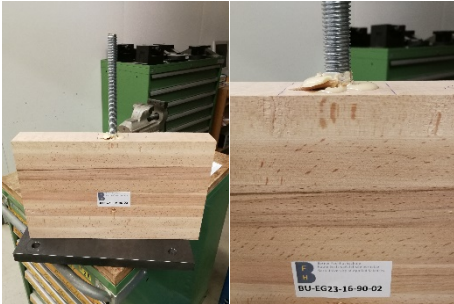


BU-EG23-16-90

Probe 1



Probe 2



Probe 3



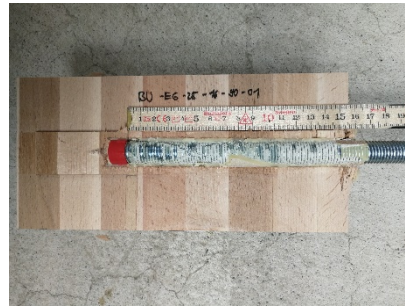
Probe 4



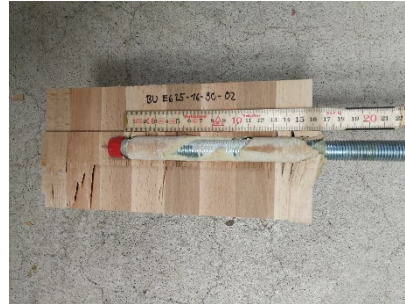
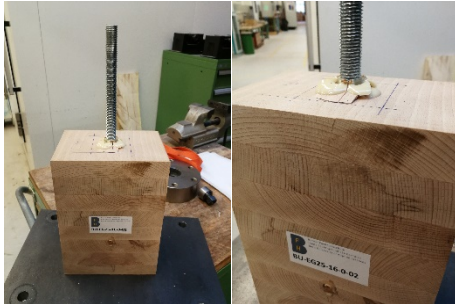
Probe 5



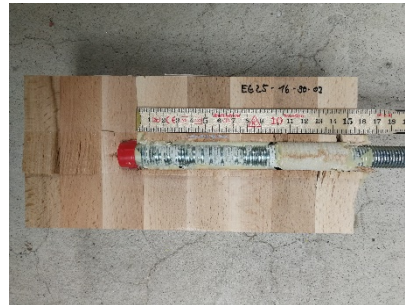
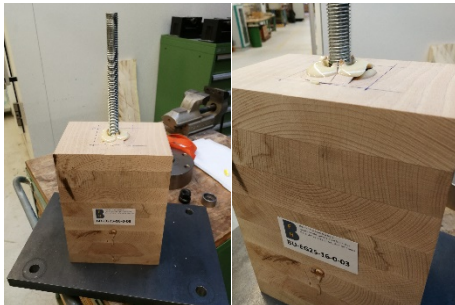
BU-EG25-16-90
 Probe 1



Probe 2



Probe 3



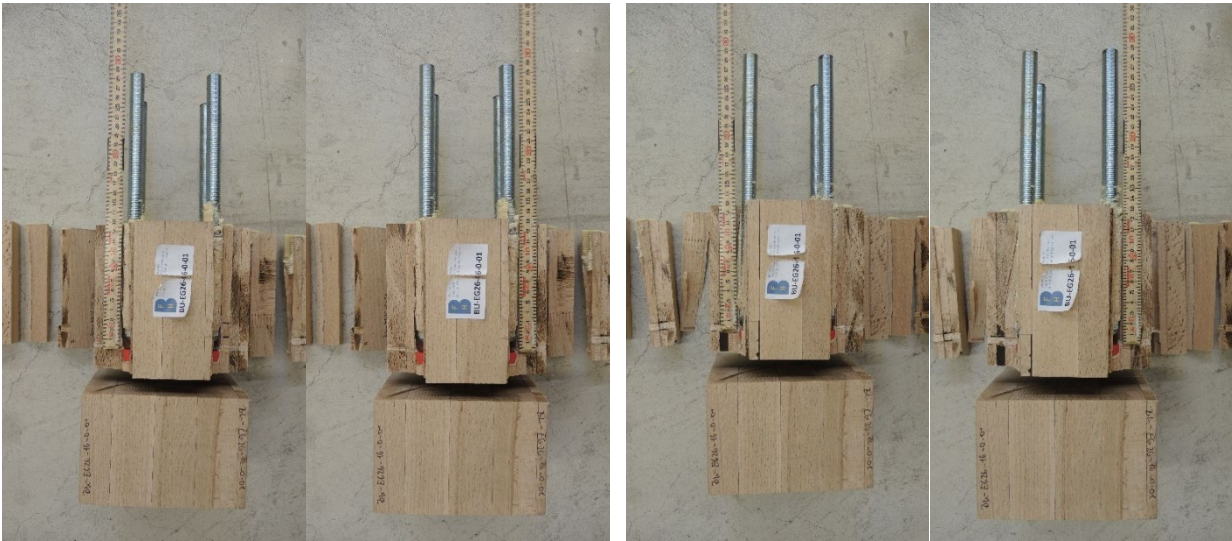
Probe 4



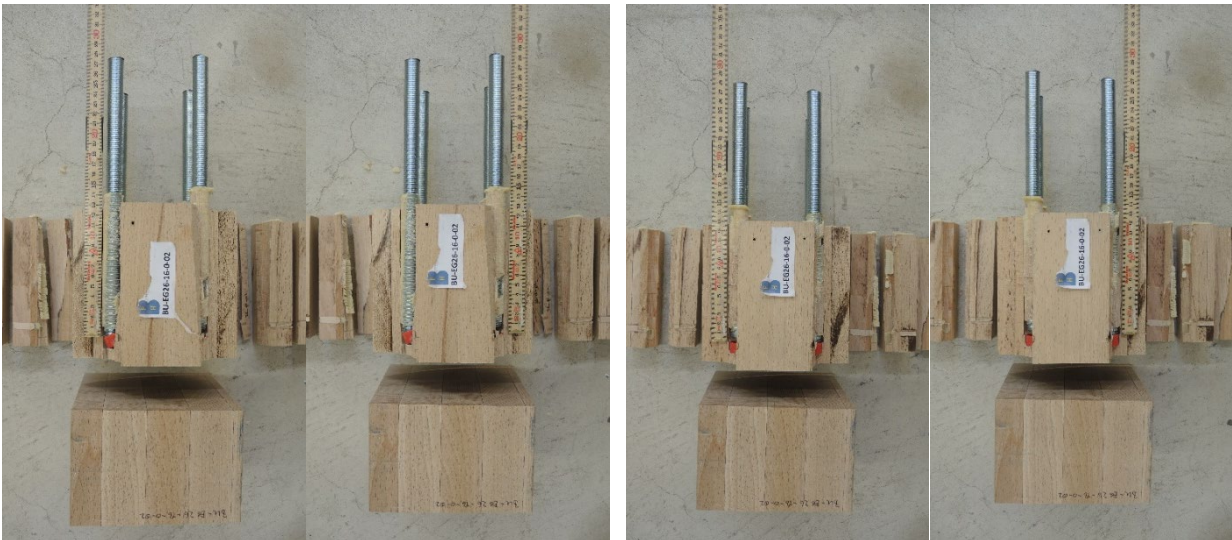
Probe 5



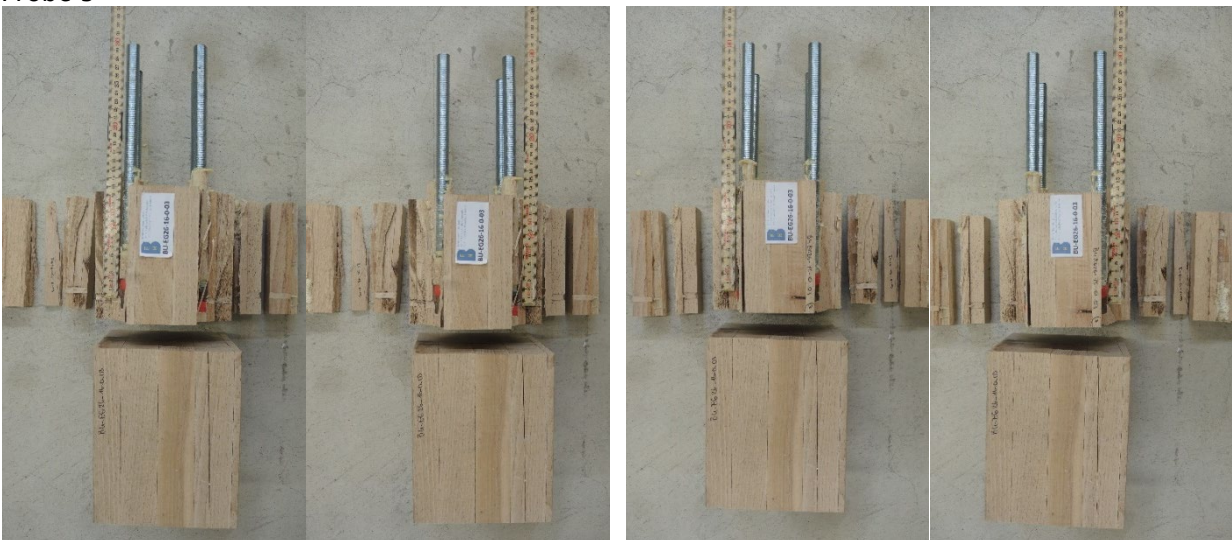
BU-EG26-16-0
Probe 1



Probe 2



Probe 3



BU-EG27-16-0
Probe 1



Probe 2



Probe 3



BU-EG28-16-0

Probe 1



Probe 2



Probe 3



BU-EG29-16-0
Probe 1



Probe 2



Probe 3



BU-EG34-16-90
 Probe 1



Probe 2



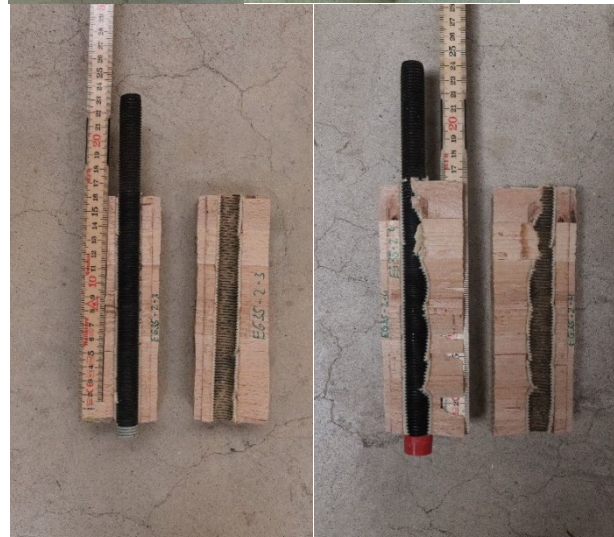
Probe 3



BU-EG35-16-0
 Probe 1



Probe 2



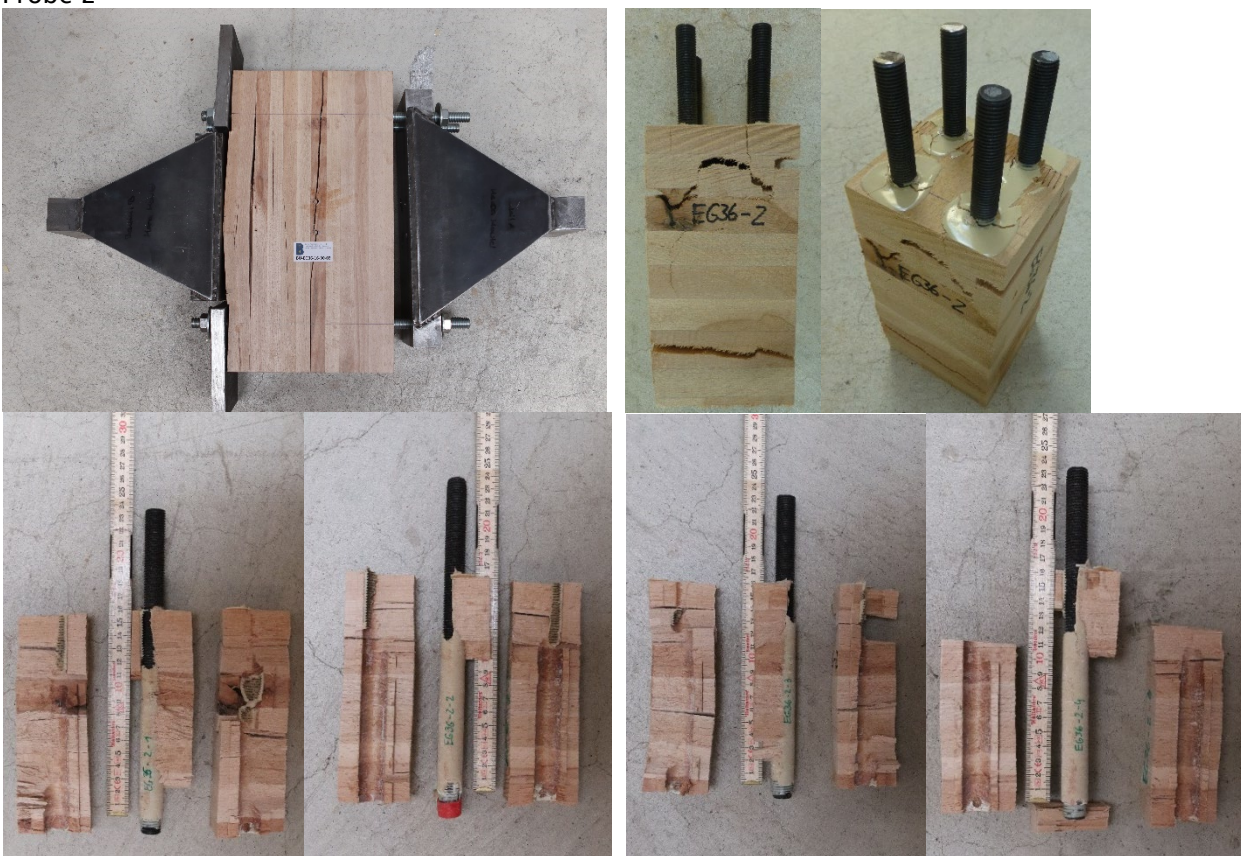
Probe 3



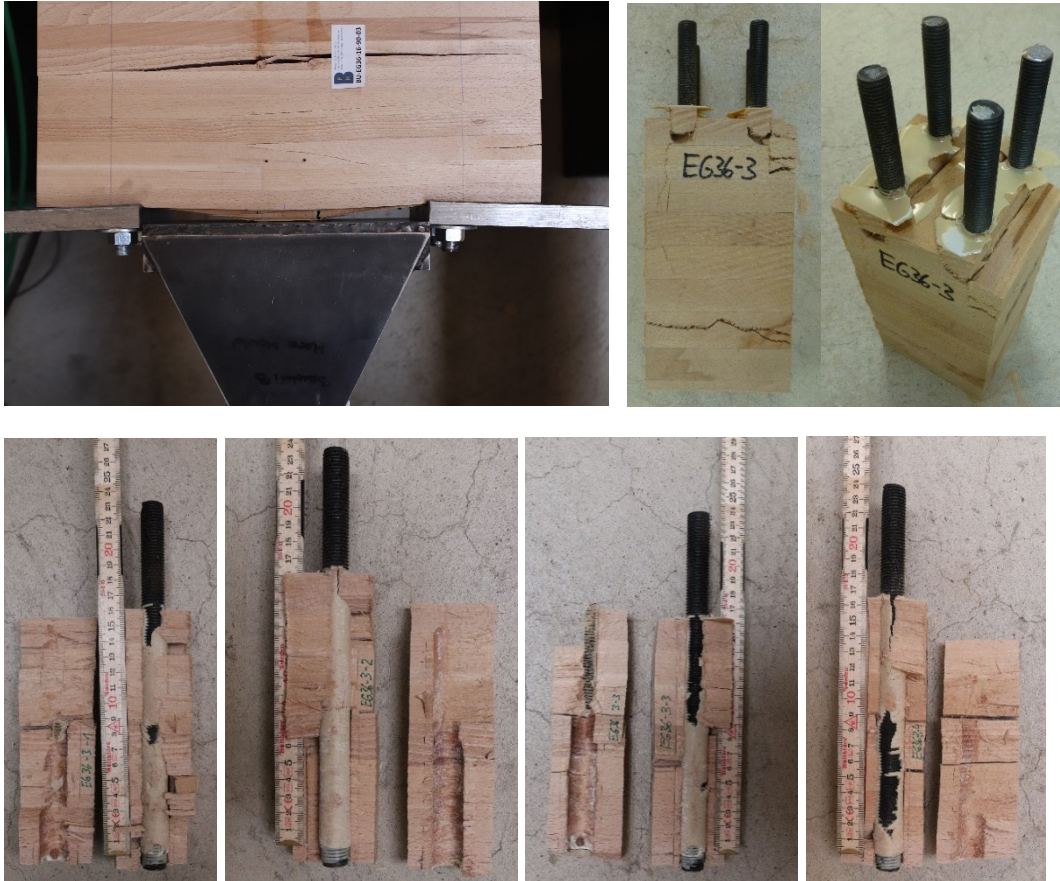
BU-EG36-16-0
 Probe 1



Probe 2



Probe 3



BU-EG42-16-0

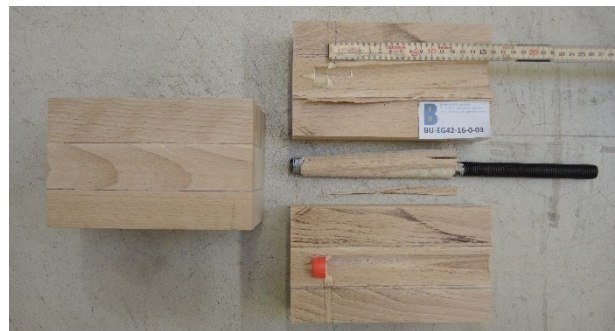
Probe 1



Probe 2



Probe 3



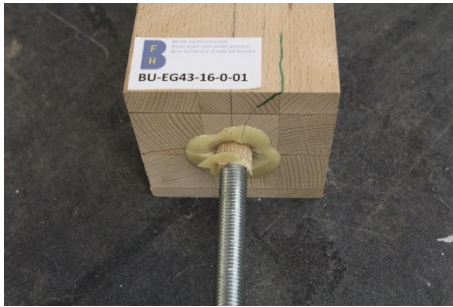
Probe 4



Probe 5



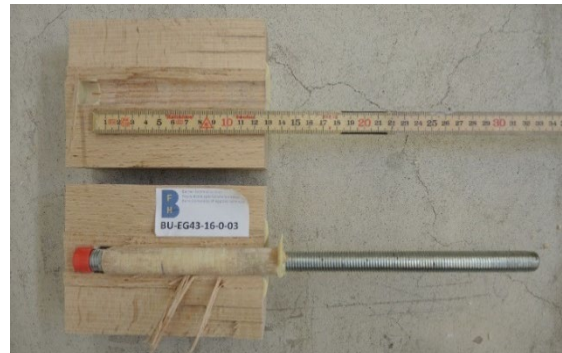
BU-EG43-16-0
Probe 1



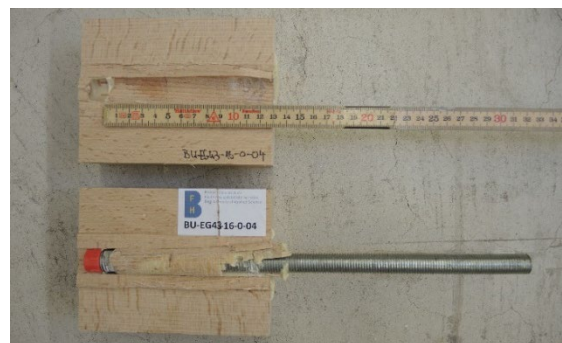
Probe 2



Probe 3



Probe 4



Probe 5



BU-EG44-16-0

Probe 1



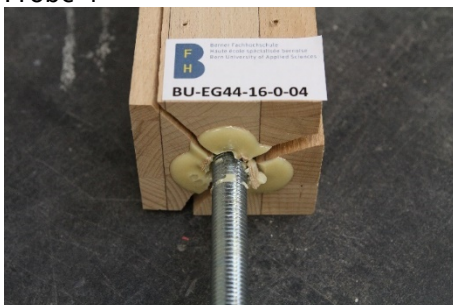
Probe 2



Probe 3



Probe 4



Probe 5



BU-EG46-16-0
Probe 1



Probe 2



Probe 3



M09-BU-16-0

Probe 1



Probe 2



Probe 3



Probe 4



Probe 5



M10-BU-16-0

Probe 1



Probe 2



Probe 3



Probe 4

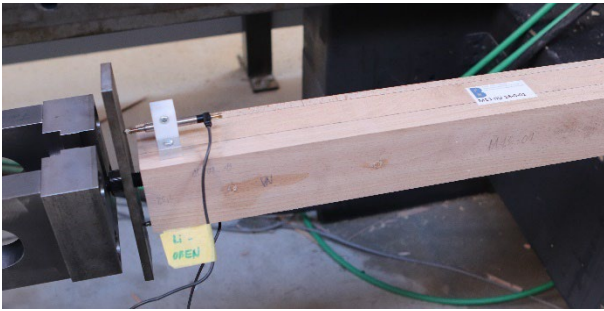


Probe 5

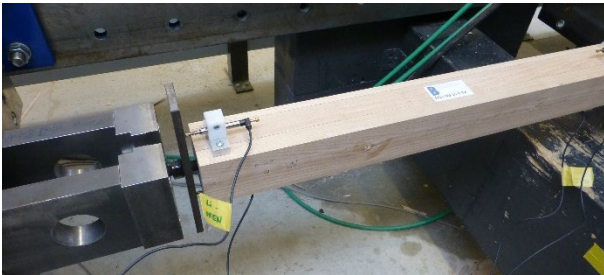


M13-BU-16-0

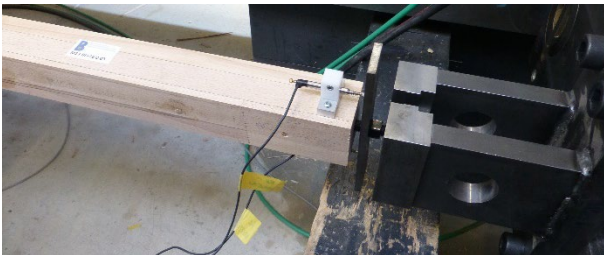
Probe 1



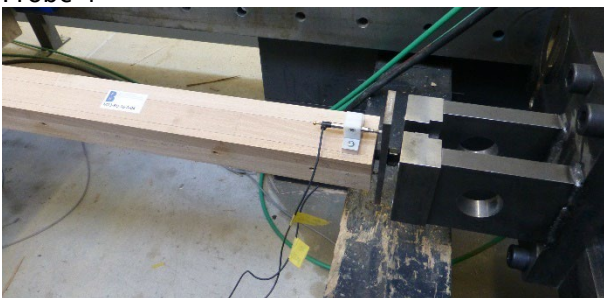
Probe 2



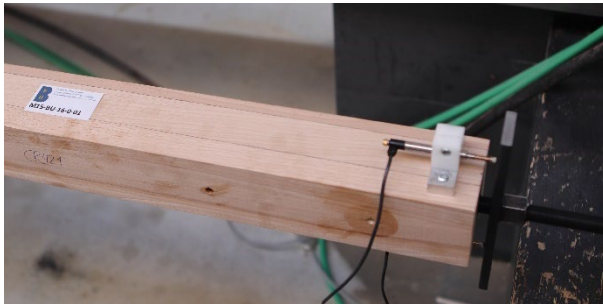
Probe 3



Probe 4



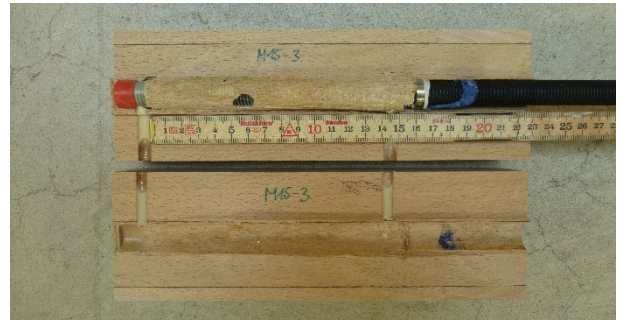
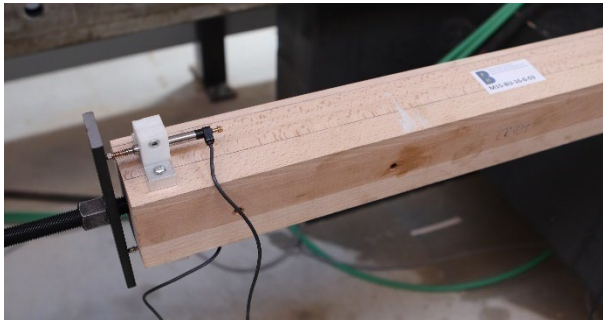
M15-BU-16-0
Probe 1



Probe 2

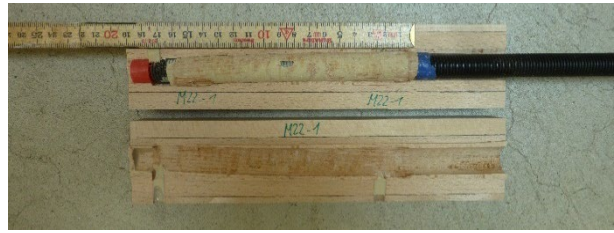
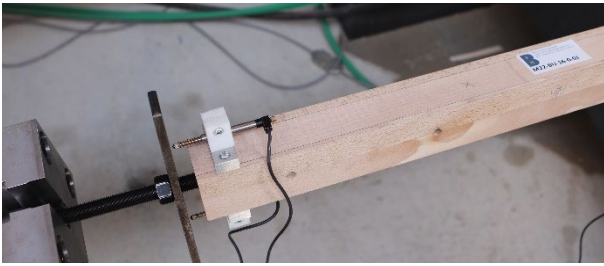


Probe 3

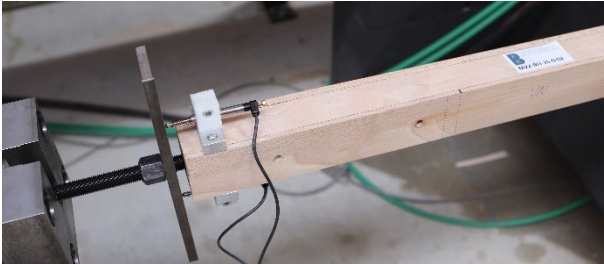


M22-BU-16-0

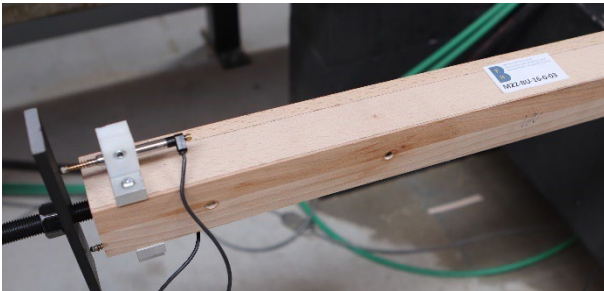
Probe 1



Probe 2



Probe 3



Berner Fachhochschule

Institut für Holzbau, Tragwerke und Architektur
Solothurnstrasse 102
Postfach 6096
CH-2500 Biel 6

Telefon +41 32 344 03 41

fe.ahb@bfh.ch
bfh.ch/ihta

Förderung

Bundesamt für Umwelt
Aktionsplan Holz

Partner

ETH Zürich
Empa, Abteilung Ingenieur-Strukturen
Häring Projekt AG
Blumer Lehmann AG
SFS unimarket AG
Würth AG
Sherpa Connector AG
Henkel & Cie. AG
Corbat Holding SA Industries du bois
Koller Sägerei AG
Krähenbühl Sägerei AG
Raurica Wald AG
Fagus Suisse SA
Bürgergemeinde Burgdorf
Bürgergemeinde Biel
Lignum Schweiz
Holzbau Schweiz

Experten

Professor Pierre Quenneville, University of Auckland, NZ
Dr. Ulrich Hübner, Fachverband der Holzindustrie Österreich

ISBN 978-3-906878-06-5

